

GRAU EN CIÈNCIES I TECNOLOGIES DE L'EDIFICACIÓ
PROYECTO FINAL DE GRADO

**ANALYTICAL COMPARISON OF MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES BETWEEN: STANDARDIZED SILICA
SAND AGGREGATE MORTAR AND RECYCLED CRUSHED RED BRICK SUBSTITUTION AGGREGATE MORTAR**

*COMPARACIÓN ANALÍTICA DE LAS CAPACIDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS ENTRE:
MORTERO DE ARENA DE SÍLICE ESTANDARIZADA Y MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE
AGREGADO DE LADRILLO ROJO CERÁMICO*

Projectista: Joan Clua Novellón

Director: Dr. José Manuel Gómez Soberón

Codirectora: Francisca Guadalupe Cabrera C.

Convocatoria: Noviembre 2014



La obra se distribuye bajo los términos y condiciones de la presente licencia pública de **Creative Commons** (“ccpl” o “licencia”) La obra está protegida por la ley del derecho de autor y/o por cualquier otra ley que resulte aplicable. Cualquier uso distinto del autorizado por la presente licencia o por la ley del derecho de autor está prohibido.

Se entiende que por el mero ejercicio de cualquiera de los derechos aquí previstos sobre la obra, usted acepta y se obliga bajo los términos y condiciones de la presente licencia. El licenciante le otorga los derechos aquí descritos considerando la aceptación por su parte de dichos términos y condiciones.



RESUMEN

El Proyecto de Final de grado en Ciencias y tecnologías de la Edificación que aquí se presenta se basa en el análisis de las cualidades físicas y mecánicas de los materiales que forman el mortero convencional, como del propio mortero, comparados con nuevas mezclas de mortero que incluyen árido reciclado proveniente de plantas de tratamiento de materiales rechazados en la industria de la construcción, en este caso la cerámica roja.

Se contrastarán morteros que contienen arena de sílice normalizada contra morteros con que contienen una sustitución de ésta por árido cerámico en distintas proporciones.

Para tal efecto, se he realizado un estudio de la investigación precedente con la intención de complementarla y dar continuidad a los conocimientos existentes en aspectos que hasta la fecha no han sido trabajados. Así, en este proyecto se tratarán dosificaciones árido/cemento que no han sido trabajadas hasta el momento durante un período analítico prolongado, 90 días, que permitirá una mayor comprensión de la evolución del mortero formado con estas nuevas mezclas.

Para el estudio en el laboratorio es crucial una buena planificación de las actividades requeridas por las normativas de los ensayos escogidos, con el fin de dar fiabilidad y coherencia a los resultados obtenidos en la investigación.

Los datos que se han analizado y comparado en la siguiente investigación entre los dos materiales estudiados son las características físicas: granulometría, peso volumétrico, contenido de vacíos, densidad, coeficiente de absorción y módulo de finura; para la caracterización mecánica de los morteros en pasta se ha analizado el análisis de fluidez con el fin de garantizar una consistencia de pastas similar a la de un material normalizado; finalmente se han realizado los siguientes análisis de las propiedades mecánicas de los morteros endurecidos: resistencia a compresión y flexotracción, determinación del módulo elástico estático y dinámico, retracción por secado y por último, índice de porosidad abierta y densidad aparente.

SUMMARY

The final degree Project in Science and Technologies of Construction that is presented here is based on the analysis of the physical and mechanic qualities of the materials composing the conventional mortar, as well as the mortar itself, compared with new mixtures of mortar which include recycled aggregate coming from treatment plants of materials refused in the construction industry, being the red ceramic the case of the study.

Mortars which contain sand of standardized silica will be contrasted against mortars which contain a substitution of ceramic aggregate in different proportions.

For such an effect, a study of the previous research has been carried out with the intention of complementing it and giving continuity to the existing knowledge in aspects that, up to the date, have not been specified. Thus, aggregate/cement dosages treated in this project have not been worked so far during a prolonged analytic period -90 days-, which will allow greater understanding of the evolution of the mortar formed with these new mixtures.

Throughout the study in the laboratory it is crucial to design a good planning to follow the activities specified by the norms from the different tests chosen, in order to give reliability and coherence to the results obtained in the research.

The data that have been analyzed and compared in the following research between the two studied materials are the physical characteristics: granulometry, volumetric weight, contents in vacuums, density, absorption factor and fineness modulus; regarding the mechanical characterization of the mortars in paste, the fluency has been analyzed in order to guarantee the required consistency to produce pastes similar to those of a standardized material; finally, the following analyses have been carried out on the mechanical properties of the hardened mortars: resistance to compression and flexotracción, determination of the static and dynamic elastic module, shrinkage and at last index of open porosity and apparent density.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	17
CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE	19
1 ESTUDIO DE LA INVESTIGACIÓN PRECEDENTE	19
1.1 MATERIAL DE SUSTITUCIÓN UTILIZADO	20
1.2 CARACTERIZACIÓN: FÍSICA, GRANULOMÉTRICA Y FORMA DE TRITURADO DEL ÁRIDO	23
1.3 PREDISPOSICIONES E IDONEIDAD PARA EL USO DEL MORTERO.....	26
1.4 NORMATIVA APLICADA EN LA INVESTIGACIÓN	28
1.5 TIPO DE CEMENTO USADO COMO CONGLOMERANTE.....	29
1.6 PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN DEL ÁRIDO.....	30
1.7 TIPOS DE ENSAYOS Y METODOLOGÍA DE ENSAYOS APLICADA	32
CAPÍTULO II. PROCESO EXPERIMENTAL	39
2 METODOLOGÍA.....	39
2.1 ORIGEN DE LOS MATERIALES.....	39
2.1.1 ARENA DE SÍLICE NORMALIZADA (ASN).....	40
2.1.2 ÁRIDO CERÁMICO RECICLADO (ACR)	40
2.1.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ÁRIDOS	42
2.1.4 CONGLOMERANTE	46
2.1.5 AGUA DE AMASADO	47
2.2 CAMPAÑA EXPERIMENTAL	48
2.2.1 DOSIFICACIÓN	48
2.2.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS	51
2.3 ENSAYOS DEL MORTERO ENDURECIDO	58

2.3.1	RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN Y A COMPRESIÓN DE PROBETAS PRISMÁTICAS DE MORTERO ENDURECIDO.....	58
2.3.2	ANÁLISIS DEL MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO (MOE_D) MEDIANTE FRECUENCIA DE ONDAS SONORAS	61
2.3.3	ANÁLISIS DEL MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO (MOE_D) MEDIANTE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS.....	63
2.3.4	ENSAYO DE RETRACCIÓN POR SECADO	64
2.3.5	DENSIDAD APARENTE Y RELATIVA DEL MORTERO ENDURECIDO. ÍNDICE DE POROSIDAD.....	66
CAPÍTULO III. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		69
3.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS FINOS	69
3.1.1	CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS	69
3.1.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	70
3.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS MORTEROS EN PASTA.....	71
3.3	CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO ENDURECIDO	72
3.3.1	RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN Y A COMPRESIÓN DE PROBETAS PRISMÁTICAS DE MORTERO ENDURECIDO.....	72
3.3.2	MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO (MOE_E).....	85
3.3.3	ANÁLISIS DEL MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO (MOE_D)	86
3.3.4	ENSAYO DE RETRACCIÓN POR SECADO	88
3.3.5	DENSIDAD APARENTE Y RELATIVA DEL MORTERO ENDURECIDO. ÍNDICE DE POROSIDAD.....	91
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES		95
4.1	CONCLUSIONES GENERALES	95
4.2	CONCLUSIONES PERSONALES	97

BIBLIOGRAFIA CITADA	99
AGRADECIMIENTOS	103

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. ASN suministrado	40
Ilustración 2. ASN dividida por el tamiz No.30	40
Ilustración 3. ACR después y antes de tamizar tamiz No.4	41
Ilustración 4. ACR una vez dividido por el tamiz No.30.....	41
Ilustración 5. Tamices No. 4 y No. 30 con el árido retenido	44
Ilustración 6. Amasadora Matest	52
Ilustración 7. Báscula de amasado y saturación previa del árido	52
Ilustración 8. Detalle de proceso de amasado y mortero finalizado	53
Ilustración 9. Proceso de ensayo en mesa de flujo	53
Ilustración 10. Detalle de resultado final de escurrimiento según norma aplicada	54
Ilustración 11. Molde normalizado de 25 x 25 x 185mm con sus pernos.....	56
Ilustración 12. Molde de 40 x 40 x 160mm	56
Ilustración 13. Mesa vibradora (A), display mesa vibradora (B),	57
Ilustración 14. Detalle cámara húmeda y tanque de inmersión	57
Ilustración 15. Prensa mecánica preparada para el ensayo de flexotracción, detalle del utillaje y probeta ensayada	59
Ilustración 16. Detalle del utillaje del análisis de compresión	61
Ilustración 17. Báscula de precisión y pie de rey para determinar la densidad aparente de las probetas	62
Ilustración 18. Dispositivo de ensayo para el MOE dinámico	62
Ilustración 19. Formas de golpeo para MOE flexión (A) y para MOE longitudinal (B)...	63
Ilustración 20. Ensayo de MOED por ultrasonidos.....	64
Ilustración 21. Detalle de probetas de retracción selladas para su aislamiento y probeta sin aislar con sus pernos de lectura.....	64
Ilustración 22. Medición de la variación longitudinal de las probetas para el ensayo de retracción por secado	65
Ilustración 23. Equipo de vacío para la saturación de la red porosa accesible.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos propiedades físicas de los áridos	39
Tabla 2. Propiedades físicas de los áridos	45
Tabla 3. Características técnicas del cemento	46
Tabla 4. Composición química del Agua de Barcelona.....	47
Tabla 5. Composición mezclas de dosificación 1:3,25.....	49
Tabla 6. Composición mezclas de dosificación 1:4,75.....	50
Tabla 7. Relación de ensayos, norma ASTM, tipo y cantidad de probetas y fechas de ensayo.....	55
Tabla 8. Propiedades físicas de los áridos	70
Tabla 9. Evolución de la resistencia a Flexotracción para dosificación 1:3,25.....	74
Tabla 10. Evolución de la resistencia a Flexotracción para dosificación 1:4,75.....	77
Tabla 11. Evolución de la resistencia a Compresión para dosificación 1:3,25.....	79
Tabla 12. Evolución de la resistencia a Compresión para dosificación 1:4,75.....	82
Tabla 13. Porcentaje de Flexión respecto a la resistencia a Compresión	83
Tabla 14. Porcentaje de relación entre resistencias en función de la dosificación (1:4,75/1:3,25).....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 1. Análisis Granulométrico ASN	42
Fig 2. Análisis granulométrico ACR	43
Fig 3. Nueva granulometría ACR.....	44
Figura 4. Nueva granulometría ACR	69
Fig 5. Evolución de la relación Agua/Cemento respecto al porcentaje de sustitución..	71
Fig 6. Relación resistencias a Flexotracción para mezclas con dosificación 1:3,25 en función de la edad de ensayo.....	72
Fig 7. Relación resistencias a Flexotracción para mezclas con dosificación 1:4,75 en función de la edad de ensayo.....	75
Fig 8. Relación resistencias a Compresión para mezclas con dosificación 1:3,25 en función de la edad de ensayo.....	78
Fig 9. Relación resistencias a Compresión para mezclas con dosificación 1:4,75 en función de la edad de ensayo.....	80
Fig. 10. Resumen resultados MOEe y resistencia a Compresión	85
Fig 11. MOE dinámico dosificación 1:3,25.....	86
Fig 12. MOE dinámico dosificación 1:4,75.....	87
Fig 13. Evolución de la retracción por secado para la dosificación 1:3,25.....	88
Fig 14. Evolución de la retracción por secado para la dosificación 1:4,75.....	89
Fig 15. Evolución de la Densidad Aparente, Relativa y índice de porosidad para la dosificación 1:3,25.....	91
Fig 16. Evolución de la Densidad Aparente, Relativa y índice de porosidad para la dosificación 1:4,75.....	93

GLOSARIO

A continuación se presentan la nomenclatura que se utilizará a lo largo del desarrollo del presente Proyecto Final de Grado:

A/C:	Relación de dosificación del mortero en función de cemento/árido.
Ag/C:	Relación de dosificación del mortero en función de cemento/agua.
ASN:	árido de Arena de Sílice Normalizada.
ACR:	Árido Cerámico proveniente de Reciclado.
ASTM:	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales).
CDW:	Construction and Demolition Waste (Residuo Derivado de la Construcción y la Demolición).
VMSSD:	Volumetric Mass in Saturated Surface Dried (Peso Volumetrico en Seco)
WACP:	Water Absorption Capacity (Densidad por Absorción)
r= 0,10	Proporcion de reemplazo del árido normalizado por árido reciclado para cada mezcla (se irá variando el índice en función de dicha proporción).
MOE _E :	Módulo de Elasticidad Estático del mortero.
MOE _D :	Módulo de Elasticidad Dinámico del mortero.
MOE _{long} :	Módulo de Elasticidad Dinámico del mortero transversal a la probeta.
MOE _{flex} :	Módulo de Elasticidad Dinámico del mortero aplicado en una cara de la probeta.
f _m :	Capacidad de resistencia a la carga del mortero.
Δf _m :	Incremento de la capacidad de resistencia a la carga del mortero.
Δf _m /día:	Incremento por día de la capacidad de resistencia a la carga.
% Δf _{mk} ~ f _{mk} REF:	Porcentaje de incremento de la capacidad de resistencia a la carga
D _A :	Densidad Aparente del mortero endurecido.
D _R ::	Densidad Relativa del mortero endurecido.

INTRODUCCIÓN

La tecnología y los recursos implicados en el sector de la construcción generan una gran cantidad de residuos, y un consecuente impacto ambiental.

Es necesario buscar formas de aligerar esta carga medioambiental, ya sea: mediante la reducción de los residuos creados en los procesos constructivos o la reutilización de estos.

Tener en cuenta una buena amortización de los materiales mediante el estudio de sus propiedades físicas y su aplicación debe ser básico en el ámbito constructivo.

Mediante una buena gestión de los recursos que rodean al sector se puede conseguir abaratar costes e incluso un abaratamiento implícito de los procesos. El camino futuro es basar la gestión de los recursos en criterios de sostenibilidad.

Como se puede ver a continuación, todas y cada una de las investigaciones realizadas hasta el momento son diferentes entre sí, y por tanto, se deben disponer los criterios para ser agrupadas, ya que varían en muchos casos los procedimientos, así como los materiales, normativa. De esta forma, se podrían generar un patrón de actuación para un estudio correcto de la investigación realizada.

Partiendo de esta base, el proyecto que a continuación se desarrolla pretende realizar un análisis de las propiedades de un material hasta ahora no testado. Para dicho fin, se acotarán los análisis que resultaran de referencia y que marcaran las propiedades de un mortero estandarizado según la relación Cemento/Árido (C/A). Una vez fijados unos valores base se compararan con variaciones sobre la misma relación C/A introduciendo, de forma gradual, un incremento del contenido en porcentaje de árido procedente de reciclaje. En consecuencia, este estudio busca soluciones para reducir el impacto ambiental mediante la gestión de los residuos generados en el proceso productivo de elementos constructivos, mediante el análisis de sus cualidades físicas y sus capacidades de trabajo como árido para mortero.

Para la realización de este trabajo se hará uso de metodologías cuantitativas y comparativas, recogiendo y analizando datos sobre este tipo específico de material de construcción, el mortero y su relación con el árido procedente de cerámica roja triturada. Con ello, se pretende comparar dos tipos de morteros con distinta relación

cemento/agua (C/A), de características objetivas y rigurosas con la normativa, y obtener como resultado criterios de comparación para estudiar, posteriormente, la validez real de los nuevos materiales con incorporación de reciclados que se han propuesto.

Se ha realizado por cada relación de C/A una serie de cinco muestras. Cada una de ellas con distinto porcentaje de sustitución del árido Normalizado, Arena de Sílice (ASN), por Árido Cerámico triturado procedente de Reciclaje (ACR). Estas muestras, a su vez, se desdoblarán en distintos amasados, para poder cubrir la cantidad de especímenes requerida por los procedimientos, de cada ensayo distinto, realizados en el laboratorio.

Los datos obtenidos de las distintas pruebas deberán pasar por un proceso de análisis, primero: coherencia de resultados respecto a las diferentes investigaciones consultadas, toda la literatura científica relacionada directamente con la sustitución de áridos normalizados por materiales reciclados en el campo de la construcción; y segundo: coherencia y reacciones de las nuevas dosificaciones propuestas respecto a las dosificaciones normalizadas de mortero de uso común en el día a día a pie de obra. Así se pretende corroborar de forma científica la idoneidad del uso de este tipo de materiales; el impacto que puede tener su incorporación en el uso cotidiano en obra; el aporte al sector de la construcción en términos de sostenibilidad; y finalmente, la posible reducción de costes que representaría el uso de materiales procedentes de reciclado, tanto en obra como en el proceso productivo de estos.

CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE

1 ESTUDIO DE LA INVESTIGACIÓN PRECEDENTE

En la literatura estudiada se encuentra un factor común: La intención de encontrar argumentos plausibles y fiables para conseguir sustituir materiales de primer uso, en el caso que nos acontece, el árido en el mortero, por materiales que se desechan o se pueden reciclar.

Los investigadores coinciden en la necesidad de utilizar materiales de los que ahora no se saca provecho, pero son relativos al campo de la construcción.

Para poder presentar unos resultados demostrables se deben usar los criterios marcados por las normativas de ensayos, tanto nacionales específicas, como las de nivel internacional. Esos criterios se han aplicado del mismo modo en el desarrollo de este trabajo. Se han estudiado y ensayado los materiales y mezclas seleccionados desde todas las perspectivas y criterios, con el fin de continuar con un desarrollo evolutivo y verificar la posible aplicación de nuevos materiales derivados. Materiales de uso tan generalizado como el mortero al que se le añade un nuevo valor: la inclusión de materiales reciclados.

El formato de esta investigación pretende dar continuidad a aquellas publicaciones previas que basan el procedimiento de análisis de las características de los morteros mediante la sustitución gradual del árido y la comparación de sus resultados.

En gran parte de los trabajos en los que se pretende sustituir los elementos que forman los morteros por material cerámico, es común la sustitución del conglomerante por finos procedentes de material cerámico triturado; dadas las capacidades puzolánicas de dicho material (1). Estas propiedades que pueden aportar los finos de sustitución cerámica del conglomerante, pese a no centrar la atención en esta investigación podrán complementar las conclusiones que se extraen de los análisis reportados en este trabajo.

Como se puede comprobar, de las investigaciones relacionadas con la sustitución en los morteros, se pueden extraer distintas similitudes que son de ayuda para definir el objetivo de la comparación y la continuidad que se pretende seguir con esta investigación.

También, cabe decir, que son destacables las diferencias necesarias para que cada proyecto tenga la originalidad necesaria para su validez, desde el punto de vista de la investigación.

Los trabajos consultados basados en la sustitución del árido pueden variar según:

- Material cerámico utilizado.
- Procedencia del material utilizado.
- Caracterización física, granulometría y forma de triturado del árido.
- Comparativa directa con distintos materiales.
- Predisposiciones e idoneidad de uso del mortero.
- Normativa aplicada en la investigación.
- Tipo de cemento usado como conglomerante.
- Porcentajes de sustitución del árido.
- Ensayos y metodología de ensayo aplicados.

1.1 MATERIAL DE SUSTITUCIÓN UTILIZADO

El material cerámico utilizado entre los distintos ensayos estudiados presenta variaciones, que dependen del uso final requerido en su proceso y la intención al reutilizar la materia considerada como residuo recuperable.

En este proyecto se ha utilizado árido triturado proveniente de rechazo de la industria productora de ladrillos para la construcción; el material base usado en la elaboración de los ladrillos es la arcilla llamada roja.

Así mismo coinciden en la utilización de Árido Cerámico Reciclado (ACR), procedente de ladrillo machacado estudios realizados, como V. Corinaldesi (2), usando ladrillos con una resistencia a compresión de 11MPa, triturados y tamizados en laboratorio.

Otros investigadores (3), también se decantan por el uso de ladrillo proveniente de rechazo de la cadena de producción. Optimizando la curva granulométrica según la normativa ASTM (4).

En otro estudio (5), se presenta la posibilidad de estudiar el mismo material con distintas granulometrías que varían dependiendo del proceso de triturado y de su similitud con la curva presentada por la ASN de referencia, permitiendo así un correcto uso del material escogido en la industria de la construcción.

Es extendida la faceta cuando se usa el ladrillo triturado en la sustitución, la de poner especial interés en las capacidades puzolánicas de la fracción más fina del triturado (6). Así como, en un ensayo posterior (7), prosigue en la investigación del mismo material incrementando las proporciones de reemplazo. También se destaca el uso de materiales de rechazados y de procedencia desconocida para mostrar las opciones de aprovechamiento y eliminar así reticencias.

En cambio, casos de uso de material cerámico procedente de demolición (CDW) como el estudio (8), donde se busca incorporar el residuo, proveniente de una planta de triturado de escombros (en Villa Musone, Italia) se selecciona, se limpian y tamizan las fracciones a utilizar con el fin de estudiar, tan solo, las propiedades del material cerámico.

En otros estudios coincidentes (9), se hace uso de CDW formado por ladrillo cerámico rojo mezclado con mortero para fábrica, siempre y cuando se controle la granulometría idónea para que sea similar a la de la ASN de referencia.

En el resto de publicaciones, las comparativas no solo se realizan entre variaciones de sustitución del agregado en la mezcla. Sino que también se incluyen nuevas variables de materiales en las comparativas. Se entiende que el autor entiende este tipo de materiales como susceptibles de tener propiedades y actuación factibles para el mortero.

Entre los materiales usados en las comparativas encontramos:

- Vidrio machacado
- Restos de producción de prefabricados de hormigón
- Restos de demolición variados
- Restos de demolición de fábrica de ladrillo cerámico
- Restos de producción o descarte de teja cerámica

En términos generales los agregados reciclados que han dado mejores resultados en la comparativa contra la mezclas de uso común han sido: los restos de producción de prefabricados de hormigón, restos de demolición y los restos de producción cerámicos.

Como ejemplos de estudios que comparan distintos materiales con mismas proporciones de reemplazo y dosificación, donde se presenta una comparativa dentro de una misma relación A/C 1:3 diferenciada entre distintos CDW (residuos provenientes de la construcción) siendo estos: restos de producción de hormigón prefabricado, restos de ladrillos cerámicos y restos de demolición variados.

Otros autores (10), presentan la posibilidad de usar agregado procedente de tejas cerámicas machacadas, aunque centran su investigación en la reacción puzolánica que el agregado puede proporcionar.

Como última reflexión, (11), realiza una comparativa con distintos porcentajes de sustitución de la fracción de árido, usando los siguientes materiales: restos de demolición, fibras de polipropileno, fibras de acero inoxidable y finalmente restos de cerámica machacados. Las mezclas entre estos materiales tienen la intención de compensar las deficiencias físicas que puede significar una sustitución única de ASN (Arena de Sílice Natural) por cualquier CDW, obteniendo así como resultado morteros mixtos muy favorables. Destacar, por ejemplo, la mezcla compuesta por agregado cerámico y fibra de acero inoxidable, da buenos resultados de acabado y consigue una reducción del efecto de retracción por secado que suelen presentar las mezclas con ACR (Árido Cerámico Reciclado).

1.2 CARACTERIZACIÓN: FÍSICA, GRANULOMÉTRICA Y FORMA DE TRITURADO DEL ÁRIDO

Los ensayos que se realizan en las investigaciones se deben ajustar a las normativas de ensayo existentes. Así como el análisis y caracterización de los áridos que se quieran emplear en la investigación.

El seguimiento de estas normas, ya sean: ISO, ASTM, UNE; tiene la labor de establecer unos parámetros comunes con la finalidad de clasificar los materiales dentro de la investigación que ocupa a este trabajo y permitir compararla con los estudios realizados con anterioridad.

Se analizaran y compararan los resultados de caracterizar los siguientes elementos que forman las mezclas de mortero:

- Composición química del cemento.
- Caracterización física de las fracciones de agregado.
 - Volumen de masa en estado seco.
 - Porcentaje de absorción de agua.
 - Fracción que pasa del tamiz 100 ASTM (ó apertura 0.150mm).

Teniendo en cuenta que el árido objeto de la investigación no es normalizado, se deberá tener un control especial sobre los resultados del análisis granulométrico, así como, el perfil final que trace la curva granulométrica obtenida.

Dado que el árido conocido de referencia en la formación del mortero es la ASN se deberá buscar la forma de asemejar el ACR a las características granulométricas del árido de referencia.

Se entiende que la ASN tiene una composición granulométrica específica, será suministrada por una planta de áridos profesional, que a su vez debe proporcionar los certificados de cumplimiento de la normativa. La planta suministradora será la encargada del formato de composición específico de árido destinados a las distintas mezclas dedicadas a la construcción.

Del mismo modo, será necesario crear en el laboratorio una composición granulométrica del ACR correcta, es decir, similar a la del árido de referencia. Dependiendo de los resultados obtenidos en la granulometría del árido de sustitución, será necesario tamizar de nuevo las muestras con el objetivo de diseñar un árido apto para la composición de un mortero. El anterior, es un trabajo de obligado cumplimiento en el laboratorio, pues el material cerámico proporcionado no proviene de una planta de áridos normalizada y, hasta el momento, no hay ninguna normativa que especifique ni certifique el uso de ACR ni su venta para la construcción.

Se deberá evitar que el árido resultante de dicha evaluación granulométrica contenga partículas de un diámetro superior a 5mm. También se deberá tener especial cuidado con el contenido de finos o partículas inferiores a un diámetro de 0.15mm.

El módulo de finura del ACR se tiene que distanciar lo menos posible de la ASN. El material usado como árido utilizado no proviene de una formación erosiva natural, sino de una acción mecánica de triturado. Dadas la fragilidad y la porosidad de la cerámica roja, se generan gran cantidad de finos, por la fricción y la descomposición característicos del proceso de triturado.

Los autores en (3) , coinciden en la necesidad de tener especial cuidado con los límites superiores e inferiores del análisis granulométrico teniendo en cuenta los diámetros específicos que deben presentar los áridos que conforman un mortero.

En este estudio donde se sigue la norma ASTM (4) para el tamizado del árido, se marca como tamiz para delimitar el diámetro máximo de las partículas con el No. 4 (4,75mm); también se indica un control del Módulo de Finura del árido comparándolo con el módulo del árido de referencia en este caso 3.01 para la ASN y 3.51 para el ACR, proveniente de ladrillo triturado.

Los investigadores en (7), destaca que la similitud de las curvas granulométricas entre el ASN y ACR es necesaria para poder eliminar el efecto de interferencia que puede tener sobre los datos obtenidos con los nuevos morteros, evitando así la distorsión de la comparativa con el árido de referencia.

De la caracterización granulométrica realizada en J.R Jiménez et al. 2013, se destaca la búsqueda de continuidad y similitud entre las gráficas de ambos materiales. Además se especifica el debido cumplimiento de las siguientes normas: UNE-EN 933-11:2009 para la distribución de tamaños de partícula y la norma ASTM C144 específica para caracterizaciones a seguir en mortero para fábricas. En conjunto se busca mantenerse bajo el cumplimiento de la norma UNE-EN 13139:2002 para agregados del mortero.

La forma de triturado del árido es un punto a tener en cuenta, dado que ello conferirá la forma al árido una morfología característica e influenciará en los porcentajes granulométricos.

Las distintas formas de machacado que aparecen en los artículos consultados son la trituradora de mandíbulas y el molino de bolas de acero.

Dependiendo del método utilizado el árido resultante será más anguloso o más redondeado respondiendo al tipo de agresión de forma diferente. Así mismo el comportamiento de las partículas y su desplome al asentarse dentro del mortero serán factores a tener en cuenta en el análisis de los resultados.

En su estudio sobre mortero para soleras de reparación (5), detalla el uso de ambas trituradoras para las distintas fracciones granulométricas que compondrán la curva deseada para el ACR. Así se usa la trituradora de mandíbula para conseguir la fracción de árido con diámetro mayor de partículas y se usará el molino de bolas para la fracción fina de la composición granulométrica.

Las comparativas realizadas en los distintos estudios mediante el factor de Volumen de Masa en estado Seco (VMSSD) delimitado por las normativas EN 1097-6 (5), muestran que la densidad del ACR es claramente inferior que la de la ASN.

Esto queda ejemplificado de forma mucho más exacta una vez se evalúa la capacidad de absorción de agua de los materiales (WACP). Fijándonos en el citado ensayo como ejemplo, comparando de nuevo ASN y ACR se detalla que la WACP del material reciclado inmerso en agua es cinco veces superior a la del material de referencia.

Estos datos se deberán tener en cuenta tanto en el agua de amasado, como en la posible retracción por secado provocada por la evidente porosidad del material.

A su vez, del contenido de finos de las muestras de material, destacar que, (siguiendo el mismo estudio citado) las cantidades de fino que pasan por el tamiz de abertura 0.15mm son 3.4 veces superiores en el ACR respecto del ASN. Por tanto, se hace evidente la limitación forzada y la redistribución de la curva granulométrica para este tipo de materiales.

La cantidad de agua añadida a la mezcla es un factor vital en la dosificación, la calidad y resistencia deseada en las muestras dependerá del contenido de humedad óptimo para la activación del proceso de la cristalización del cemento. Se deberá tener en cuenta la posible puzolanidad de la fracción fina de agregado y la contribución de ésta al endurecimiento del material suponiendo así un consumo de agua agregado al del propio cemento. No hay que olvidar que el cemento y su capacidad de endurecimiento será el condicionante último de la dosificación, marcando junto con el árido la cantidad de agua necesaria para la cada mezcla de mortero.

1.3 PREDISPOSICIONES E IDONEIDAD PARA EL USO DEL MORTERO

Dependiendo de la propuesta inicial del estudio y de la aplicación que se estime según de las cualidades del material resultante, se valoran distintas aplicaciones para el mortero con sustituciones de agregado cerámico.

Las aplicaciones para este tipo de morteros son:

- **Mortero para soleras:**

Dado que se puede tener en cuenta como un mortero que contiene materia residual de menor calidad que la arena de sílice normalizada, muchos estudios proponen este uso como el menos arriesgado a nivel de seguridad estructural.

Puntualizar que dependiendo del porcentaje de sustitución del árido, este uso puede plantear problemas. Vistos los resultados de deformación experimentados por el material, se debería tener en cuenta el agrietamiento en la utilización en masa. Se aconseja por tanto realizar un buen control durante el proceso de curado y a lo largo de toda su maduración.

Estudios como (7), revelan que en el umbral de los 28 días de maduración se producen las mayores deformaciones, relacionadas con el final de las reacciones químicas exotérmicas que provocan micro fisuras internas en los enlaces químicos realizados a temprana edad. Finalmente a los 80 días el porcentaje de deformación total sobre el mortero de referencia es superior en 13%.

Otras investigaciones como (3), aseguran que, las deformaciones de las muestras de morteros con sustitución de ACR en pequeño porcentaje pueden llegar a ser menores. Se estima que el material cerámico recoge y almacena agua en sus poros y es liberada más lentamente. Esto supone un mayor nivel de humedad interna del material durante el proceso de maduración, que evitará la evaporación provocada por las primeras reacciones exotérmicas.

- **Mortero de restauración:**

En (5), la autora asegura resultados “excelentes” relacionados con la variabilidad de la granulometría aportada por el árido cerámico machacado. Las características propias aportan buenos resultados de permeabilidad al vapor de agua, adherencia en cuanto al recubrimiento y muy buenos resultados de adherencia en paramentos de fábrica de ladrillo

La mejor permeabilidad de vapor se explica por la mayor cantidad de macroporos que añade el agregado cerámico así también contribuye a una menor absorción por capilaridad.

Pese a que en el cómputo general la resistencia a Flexión resulta inferior los resultados son positivos para el módulo elástico. Estos resultados se pueden atribuir, según los investigadores, a la angulosidad de las partículas de ACR triturado.

La adherencia a los elementos de ladrillo mejora respecto al mortero de ASN, de nuevo gracias a la existencia de finos en el ACR así como la mayor capacidad de retención de agua que permite una mayor permeabilidad en los poros del paramento.

- **Mortero estructural:**

Pese a que pudiera parecer todo lo contrario mucha de la investigación revisada concluye en los buenos resultados ante los análisis de la resistencia mecánica del material. Normalmente los resultados no son los mismo que los del mortero de referencia, evidentemente es otro material totalmente distinto, pero en buen número de casos el material ensayado a larga edad y con reemplazamientos del material base menores de 40% da resultados incluso superiores al material de referencia. Como referencia el estudio de J. Silva et al. 2008.

Los módulos elásticos estáticos, la capacidad de unión entre materiales y la ligereza añadida le confieren unas buenas características para su utilización en paramentos de fábrica y en obra nueva. Cabe recordar que ya hay países que por normativa incorporan la sustitución de los materiales tradicionales por este tipo de materiales de aplicación en obra nueva.

1.4 NORMATIVA APLICADA EN LA INVESTIGACIÓN

La procedencia de los trabajos estudiados es muy distinta, por ello cabe entender que la aplicación de normativas dependerá del ámbito de divulgación del estudio o de la simple preferencia que tenga el autor del trabajo por las normas, ya sean o no propias de su ámbito regional o estatal.

Uno de los principales fueros del estudio para la potenciación del uso de estos materiales es Italia; cabe destacar el trabajo continuado de V. Corinaldesi y su equipo de investigadores, unos de los más prolíficos es el estudio de la sustitución de CDW. Por lo general, suelen utilizar la norma UNI (*Ente Nazionale Italiano di Unificazione*) para todos su ensayos, en particular usan la distinción UNI-EN (*Comité Européen de Normalisation*) que ejemplifica la similitud entre todas las normas aplicables a las regiones científicas.

Unas normas provienen de las otras y viceversa, uso de estas es obligado para crear un marco normativo de investigación en el que poder referenciar, afianzar y dar fiabilidad a las distintas prácticas para poder contemplar y contrastar los resultados obtenidos. Fuera del ámbito Europeo, la normativa de uso en investigación más extendida y que engloba a un mayor número de países bajo su referencia es la norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Como se ha comentado las normas tienden a derivar y confluir las unas con las otras, pese a que se puedan observar pequeñas variaciones en los procedimientos, unidades y requerimientos. El uso de cualquier norma vigente oficializa todo proyecto de investigación que se debe llevar a cabo en el laboratorio.

Las normativas determinaran las características y conservación de los especímenes; los materiales adecuados; las formas de comparar y evaluar la información obtenida; así como las condiciones de ensayo de los morteros y las características de estos ensayos: maquinaria e instrumentalización. Todos estos aspectos pueden ser detallados o no en los estudios publicados dado que la simple referencia a la norma nos informará al detalle de todos estos aspectos.

1.5 TIPO DE CEMENTO USADO COMO CONGLOMERANTE

La elección del tipo de cementos es un factor importante a tener en cuenta, como se ha comentado. La elección repercute directamente en los resultados de los análisis de resistencia, dado que influirá la propia resistencia característica del portland.

Por esa razón se hace necesario objetivar dichos resultados, realizando comparativas con elementos normalizados que sirvan de referencia para los valores obtenidos por las nuevas mezclas de mortero.

Dado que cada tipo de cemento tiene diferentes capacidades mecánicas, se debe tener en cuenta en la comparación directa de distintos análisis y en la desviación que esto provoca al intentar unificar los resultados de los trabajos realizados hasta el momento.

El tipo más comúnmente utilizado es el cemento portland CEM II/B-L 32,5R. Éste es un tipo de cemento con adiciones, en un ratio de 21% a 35% de caliza y caracterizado por reportar alta resistencia inicial, con una resistencia de 35.5 Mpa. Aunque en algunos casos encontraremos variaciones en la composición la resistencia que se suele cumplir sobretodo en el ámbito europeo es que la resistencia sea de 32,5 Mpa.

Los distintos investigadores hacen uso de una amplia variedad de tipologías de cemento portland dependiendo de sus hipótesis iniciales y del enfoque que prefieran para sus estudios.

Según normativa se requiere el uso de un cemento tipo CEM I sin aditivos que puedan interferir en los resultados y la objetividad de las muestras.

Sin olvidar que las comparativas realizadas dentro de los estudios se objetivan mediante la comparativa entre las mezclas realizadas con el mismo tipo de cemento, es interesante que el cemento utilizado en los distintos estudios sea el mismo o que como mínimo tenga la misma resistencia.

Entre la literatura estudiada destacar (9), que usa un CEM IV/A (V) 32.5N: un cemento puzolánico con adiciones de cenizas volantes. Es curioso su uso por las claras interferencias que puede ocasionar en la investigación relacionada con ACR.

En (5), la autora usa un CEM II/B-L 32.5R según la norma UNI-EN 197-1 dando continuidad de criterio a los estudios propios realizados anteriormente (2); en ambos casos se trata de un cemento del tipo CEM II con una resistencia mínima de 32,5 Mpa a los 28 días.

En otros estudios (3) tan solo se especifica el uso de un mortero ASTM tipo I. conforme a la norma ASTM C150-05 (12).

1.6 PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN DEL ÁRIDO

Según se han considerado oportunos, se toman distintos porcentajes de sustitución para cada investigación, teniendo en cuenta la posible aplicación o las expectativas del resultado que pudiera dar el mortero obtenido.

La mayoría de trabajos hacen una sustitución por peso del árido lo que comporta un evidente aumento del volumen final de la mezcla dada la densidad de un material más poroso como el cerámico. En un principio esto produce una alteración evidente en la muestra como nos apunta el estudio (5), es necesaria mayor cantidad de agua en la mezcla para conseguir las condiciones de fluidez y trabajabilidad necesarios.

Algunos analistas (9), se decantan por el reemplazamiento en proporciones volumétricas frente al procedimiento normal de sustitución por peso. Aunque no es el procedimiento más común, se obtienen resultados positivos dentro del marco de la investigación con un buen comportamiento de las mezclas con sustitución parcial del árido de referencia ASN por material ACR.

La sustituciones se suelen referenciar porcentualmente sobre el contenido de árido, así se denominará una sustitución del 10% cuando se mantenga un 90% de arena de sílice correspondiente según la dosificación cemento/arena (1:4 p.e)

Así pues, en porcentajes de sustitución bajos observamos mejoras de resistencia mecánica como se destaca en (7), y disminuciones de un 10-13% en estudios como el (3), (pueden variar las dosificaciones, características del material substituido, contenido de finos,etc.).

Es en los casos que el porcentaje de sustitución total o casi total dónde encontramos mayores desviaciones respecto de las capacidades mecánicas del mortero de referencia.

En el punto que más influye la sustitución, es en el módulo de elasticidad, dónde se entiende que adquiere una importante relevancia la morfología del árido que se incorpora. La cerámica machacada es más porosa, angulosa y como ya se ha comentado puede provocar micro fisuras durante el primer mes de curado que afectan al monolitismo de las piezas.

Así también, cabe destacar que las mejora de la permeabilidad de vapor como se indica en (5), que pese a estar íntimamente relacionadas con la absorción de agua provocan una buena relación, seguramente ocasionada por un mayor tamaño de los poros.

No hay que olvidar que la intención de los estudios es reemplazar el árido normalizado en uso común por otro que permita un mayor aprovechamiento de los recursos al alcance, optimizando los materiales de los que se dispone en el sector de la construcción. De ese modo se busca poder dar un nuevo uso a materiales que actualmente se desechan o que pueden llegar a representar un problema en su gestión y procesamiento. Es decir, cuanto mayor porcentaje sea capaz de asimilar una dosificación de mortero, con resultados aceptables a nivel normativo, mayor será el aprovechamiento y la optimización de los materiales.

1.7 TIPOS DE ENSAYOS Y METODOLOGÍA DE ENSAYOS APLICADA

1.7.1 Tipos de ensayos

Este estudio pretende evaluar los resultados mecánicos procedentes del análisis de un mortero de referencia con arena de sílice en distintas dosificaciones. Para ello se comparará con variaciones sobre la misma dosificación variando el contenido de árido de referencia ASN, sustituyéndolo de forma gradual hasta llegar a una sustitución total por el ACR. Ello nos permitirá evaluar la relación entre el porcentaje de sustitución y las cualidades mecánicas del mortero obtenido.

Para describir los áridos se deberán realizar los siguientes análisis:

- Granulometría
- Densidad aparente
- Porcentaje de humedad y capacidad de absorción
-

El estudio de las capacidades mecánicas de los morteros se realizará mediante:

- Análisis a compresión
- Análisis a flexión
- Análisis a compresión
- Retracción por secado

Todos los ensayos enumerados son comunes en gran parte de los trabajos consultados. Otros acarrearán una investigación más profunda teniendo en cuenta análisis como:

- Reacción álcali-sílice
- Respuesta a ciclos de congelación
- Resistencia a la permeabilidad de vapor de agua
- Absorción por capilaridad
- Capacidad adherente a elementos de fábrica
- Susceptibilidad al agrietamiento

Continuando con este tipo de análisis se consiguen caracterizar más aspectos de la aplicación del material tratado.

1.7.2 Temporización de los ensayos

La evaluación de las probetas está íntimamente ligada a los tiempos de ensayo, dados la evolución o curado de los materiales. Siendo un aspecto básico a decidir en el proceso analítico.

Aunque se pueden hacer pruebas con anterioridad, los estudios precedentes toman como fecha de referencia de curación y análisis los 28 días. En éste momento ha tenido lugar gran parte de la transformación química de la estructura del mortero y se considera que se encuentra en situación de trabajo. Sobre esta fecha se relacionarán las capacidades de trabajo del material, si es viable o no su uso y posterior aplicación profesional.

Se considera oportuno realizar un seguimiento continuado a lo largo de la maduración del material con el fin de registrar como responde al paso del tiempo o a distintas condiciones de conservación.

Una serie común es seguir un análisis periódico semanal desde el tercer día de maduración del mortero hasta los 28 días después de su amasado. Los investigadores en (6), realizan un curado de los especímenes a analizar su resistencia a compresión de 28 días en inmersión.

Dependiendo del criterio el investigador, la serie analítica se puede prolongar lo que se estime necesario. Es posible que la toma de datos se dilate hasta los 60, 70, 90, días; hasta períodos de evaluación anuales con unas tomas de datos más separadas en el tiempo, dado que el mortero ya no sufre tantos cambios físicos, químicos ni morfológicos al quedar consolidado y adecuado a un ambiente de trabajo.

1.7.3 Condiciones de conservación de las muestras

El curado y madurado de las muestras es un aspecto a tener en cuenta y se debe llevar un buen registro de las condiciones en las que se almacenan las muestras estudiadas.

Una vez realizado el análisis de los estudios precedentes se puede decir que no se presentan unos datos que permitan compara las situaciones de almacenamiento y ambientales a las que han estado expuestas las muestras durante los períodos de realización de los análisis.

En este punto cabe destacar una divergencia notoria entre la norma europea EN y la americana ASTM dónde las condiciones de curado del material son distintas. La norma EN recomienda un curado, primero en inmersión y luego en cámara húmeda a una temperatura máxima de 24°C; mientras que la norma ASTM recomienda un curado continuado en inmersión. Se entiende que las dos pretenden garantizar una humedad continuada que no altere las reacciones normales del mortero y evitar así que acuse estar en condiciones secas. Aunque es evidente que las características de un espécimen totalmente sumergido variarían del que tiene contacto con el aire.

1.7.4 Relación agua/cemento

La dosificación agua cemento se puede admitir como tema de controversia cuando se realiza el amasado de los distintos morteros se convertirán probetas y por lo tanto testigos de ensayo.

El hecho de estar trabajando con un material altamente poroso altera la concepción básica de amasado de un elemento tan estandarizado como es el mortero de referencia confeccionado con arena de sílice normalizada.

La dosificación normal y más usada es una relación 0,5 entre cemento portland y agua. La solución mayoritaria para este aspecto, dado que el árido cerámico tiene una avidez superior a la arena de sílice por su porosidad, será garantizar una consistencia de la mezcla resultante del amasado. Normalmente entre $120\pm 10\text{mm}$ y $175\pm 10\text{mm}$ comprobada sobre la mesa de sacudidas. En el estudio (2), se toma como referencia de escurrimiento $110\pm 5\text{mm}$ en la mesa de sacudidas, marcada por la norma UNI EN 1015-3; donde se destaca que cuanto mayor sea la porosidad del material agregado mayor será la cantidad de agua necesaria para conseguir la consistencia deseada.

La procedencia del agua usada en la mezcla es factor clave, dado que no todas tienen la misma composición. El uso de agua del grifo o corriente es el más extendido, dejando la caracterización de esta en segundo plano. Aunque también se detectan casos en que se usa agua embotellada con la finalidad de dar un punto más aséptico al análisis realizado, como por ejemplo en (3).

1.7.5 Caracterización mecánica de los morteros

Con la intención de acotar las características mecánicas de trabajo de los morteros estudiados se elaboran probetas que serán ensayadas a lo largo de la maduración de la mezcla. Los ensayos que se realizan para evaluar la resistencia mecánica son los de flexión y compresión. Mediante la resistencia característica que ofrezca la mezcla de mortero en cada ensayo realizado a distintas edades de maduración se elabora una curva, en esta se observa la evolución resistencia tiempo de la mezcla el estudio (2), utiliza en su investigación especímenes prismáticos de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ que se analizarán a compresión y flexión en los siguientes días 1, 7 y 28 del curado siguiendo las indicaciones de la norma UNI EN 1015-11.

Estos destacan que los resultados para las mezclas con agregados reciclados porosos, dado que requieren de una proporción superior de agua/cemento para su amasado indican unas resistencias inferiores a las mezclas de referencia.

En el caso de (5), el procedimiento es el mismo, se analizan especímenes siguiendo la misma norma UNI curados durante 28 días, en este caso varía la forma de triturado de

los materiales y las dosificaciones. Los resultados mantienen la coherencia con el estudio anterior siendo en su punto máximo de 30 MPa para el mortero de Referencia a los 28 días en el ensayo a compresión y de 5 MPa para la mezcla con mayor presencia de partículas finas de árido reciclado.

En el estudio (6), se realiza una comparativa entre distintos tipos de agregado reciclado, siguiendo la misma norma EN 1015-11, analizando los especímenes a 28 de curación.

Cabe destacar que el mejor resultado de resistencia tanto a flexión como a compresión es para las mezclas con agregado cerámico, aumentando su resistencia a medida que se incorpora una mayor cantidad de cerámica en la mezcla; con unos porcentajes de sustitución de 0 a 10%.

Siguiendo con las referencias de sustitución, el ensayo (7), destaca que los mejores resultados para una sustitución de la arena del mortero mediante material cerámico se observan en un ratio del 50%. Las resistencias a compresión son crecientes hasta llegar a dicho porcentaje, luego descienden. Así como, las resistencias a flexión documentadas se mantienen sin destacable variación a pesar de las distintas proporciones de sustitución.

En el estudio de (9), los resultados de los análisis de resistencia a compresión y flexión revelan una mayor resistencia de las nuevas mezclas de mortero sobre la de referencia que se pueden deber al procedimiento de sustitución mediante proporción volumétrica. Los ensayos en este caso se prolongan hasta una maduración de 180 y dan unos resultados medios de compresión de 7,5 MPa. Los autores acreditan los resultados por coincidentes con los estudios de Silva et al. 2010, donde se observa un incremento de las resistencias entre un 20-40% al usar reciclado cerámico. Esto se puede deber a los contenidos de finos que tienen estas fracciones de áridos que podrían tener capacidades puzolánicas dentro de la mezcla y maduración de los morteros.

Otra de las formas de caracterizar la resistencia de un mortero es mediante el módulo de elasticidad obtenido en los distintos ensayos de ruptura de los especímenes.

Los autores en (8), destacan la reducción del Módulo de Elasticidad Estático de los morteros con agregados cerámicos en relación al mortero normalizado.

En el caso de (13); el análisis del Módulo de Elasticidad se realiza mediante un ensayo que aplica vibraciones en los especímenes, también llamado Módulo de Elasticidad Dinámico. Los especímenes son ensayados a una edad de dos y cinco meses respectivamente, observando una regresión del valor de los módulos del 18% a los dos meses y del 17% a los cinco meses. El ensayo compara un mortero de referencia normalizado con una dosificación 1:4 (cemento/árido) respecto de una dosificación 1:6. Se trata de morteros con una sustitución de un 10% del agregado por ladrillo cerámico machacado

1.7.6 Ensayo de retracción por secado del mortero

Según se puede ver, las investigaciones anteriores en este campo han puesto una especial atención sobre del comportamiento físico del mortero una vez endurecido. Ya que los materiales incorporados pueden tener distintas reacciones ante los procesos químicos de maduración del mortero.

Especialmente en el caso de la sustitución de ASN por ACR hay una clara influencia de la proporción de agua en la mezcla.

De inicio se ha podido comprobar que la relación A/C es mayor por la aidez y porosidad del material cerámico, el grado de finura del árido también es elevado así como la capacidad de retener agua de las partículas cerámicas.

En este aspecto el agua es muy importante puesto que la cantidad de humedad en la masa de mortero variará al final del proceso de maduración y eso conllevara una variación del volumen final de la probeta, en este caso. Si es necesaria mayor cantidad de agua para el proceso de amasado pero a la vez no es necesaria para el endurecimiento del cemento se acabará eliminando y restando volumen.

En (9), destaca que la retracción de las distintas probetas se realiza de forma lineal sin sobresaltos respecto al comportamiento del mortero de referencia. Se apunta que los ratios de sustitución superiores al 10% han dado retracciones ligeramente superiores.

El estudio (7), marca que se han usado probetas de 40 x 40 x 160 mm para tal estudio, siguiendo la normativa EN- 1015-13 (1993). Los resultados dibujan una tendencia continua entre las mezclas con agregado que, eso sí, se acaban distanciando un 33-43% sobre el mortero de referencia.

En (6), se usa el mismo criterio de probetas. Se deduce que el aspecto que incide en variaciones porcentuales de un 13% de los morteros con ACR respecto a los de referencia es el contenido en finos de la mezcla, pues aumenta la capacidad de retracción.

Finalmente en (3), presenta que los morteros con sustituciones inferiores al 10% en ACR resultan con más retracciones que los que tienen sustituciones superiores al 20%. Esto se podría explicar por la mayor porosidad del material al contener más árido cerámico, ya que este tiene la capacidad de almacenar más humedad y soltarla de forma gradual.

CAPÍTULO II. PROCESO EXPERIMENTAL

2 METODOLOGÍA

2.1 ORIGEN DE LOS MATERIALES

Para llevar a cabo la investigación de sustitución de material normalizado por material reciclado en mezclas de mortero es necesario caracterizar los áridos que se van a utilizar. Para evaluar sus características tanto físicas como mecánicas se han realizado los siguientes ensayos indicados por la normativa ASTM [Tabla 1].

Tabla 1. Ensayos propiedades físicas de los áridos

Ensayo	Norma
Granulometría	ASTM C144-99 (14), ASTM C136 (15), ASTM C702-98 (16)
Materiales más finos que el tamiz 75µm(200)	ASTM C117-95 (17)
Módulo de finura (MF)	ASTM C136-06 (15)
Densidad aparente (peso unitario) compactado/suelto y vacíos	ASTM C29/C29M-97 (18)
Densidad	ASTM C128-04a (19)
Absorción	ASTM C128-04a (19)

Una vez citados, se explica el resultado de dichos ensayos de caracterización del árido en seco.

Los ensayos han sido de vital importancia para estudiar las características iniciales de los áridos, permitiendo así la corrección de las curvas granulométricas y el diseño de una nueva granulometría para los materiales.

2.1.1 ARENA DE SÍLICE NORMALIZADA (ASN)

El árido característico usado para la comparación es una Arena de Sílice Normalizada. Se ha obtenido mediante un distribuidor de árido local, cuenta con su caracterización como arena dispuesta para su uso en mortero de obra [Ilustración 1]. A pesar de que el fabricante garantiza la composición según la norma se ha realizado el consiguiente estudio en el laboratorio.



Ilustración 1. ASN suministrado



Ilustración 2. ASN dividida por el tamiz No.30

2.1.2 ARIDO CERÁMICO RECICLADO (ACR)

El árido reciclado utilizado en el estudio proviene de la producción de teja cerámica. El material usado para su elaboración es la arcilla roja formada por partículas muy pequeñas de silicatos hidratados de alúmina, además de otros minerales como el caolín, la montmorillonita y la illita.

El ACR utilizado en este estudio proviene de la producción de material de construcción, siendo parte del material descartado por no cumplir los estándares de producción de la teja. Ha sido suministrado por una empresa local con autorización de la Agencia de Residuos de Catalunya para la gestión del reciclaje de residuos provenientes de la construcción, el material ha sido triturado y con una granulometría de 0 a 5 mm, por lo que deberá ser cribado por el tamiz No.4 [Ilustración 3] para establecer un tamaño máximo de uso para morteros.



Ilustración 3. ACR después y antes de tamizar tamiz No.4



Ilustración 4. ACR una vez dividido por el tamiz No.30

Destacar que a simple vista se aprecia un alto contenido en polvo o finos y unas fracción gruesa muy angulosa y porosa. Para contrastar esta primera impresión y conseguir datos característicos se procede al análisis en seco del material en el laboratorio.

2.1.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ÁRIDOS

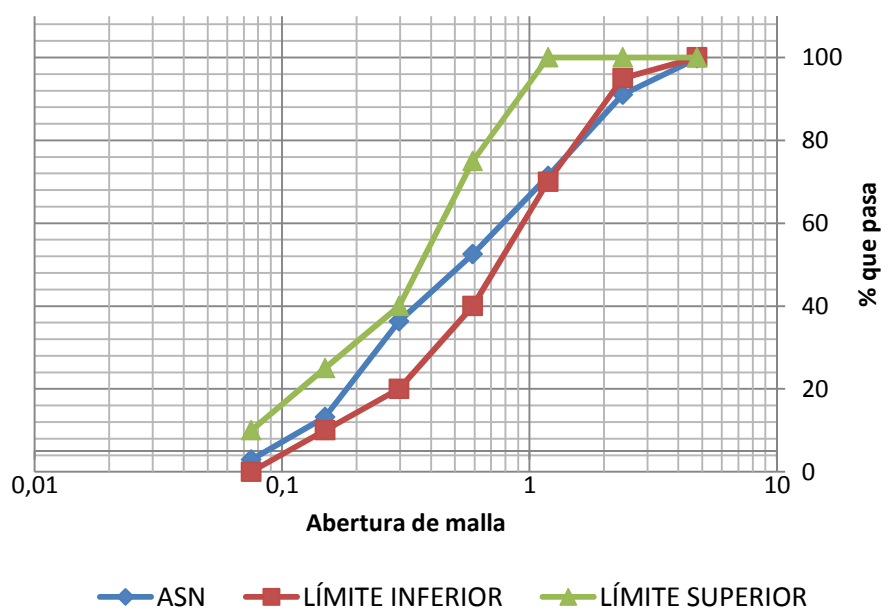
Tanto la ASN como el ACR han sido ensayados con el fin de determinar sus propiedades físicas siguiendo los procedimientos indicados por las normas citadas en la Tabla 1.

2.1.3.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

ARENA DE SÍLICE NATURAL (ASN)

La curva granulométrica [Fig 1] obtenida de la arena reciclada cumple con soltura con los límites establecidos por la norma.

Fig 1. Análisis Granulométrico ASN



Pese a ser así, conociendo los resultados de la granulometría del ACR, se decide garantizar la mayor compacidad y cohesión del mortero diseñado una mezcla que garantice la misma cantidad de partículas gruesas y finas en el árido.

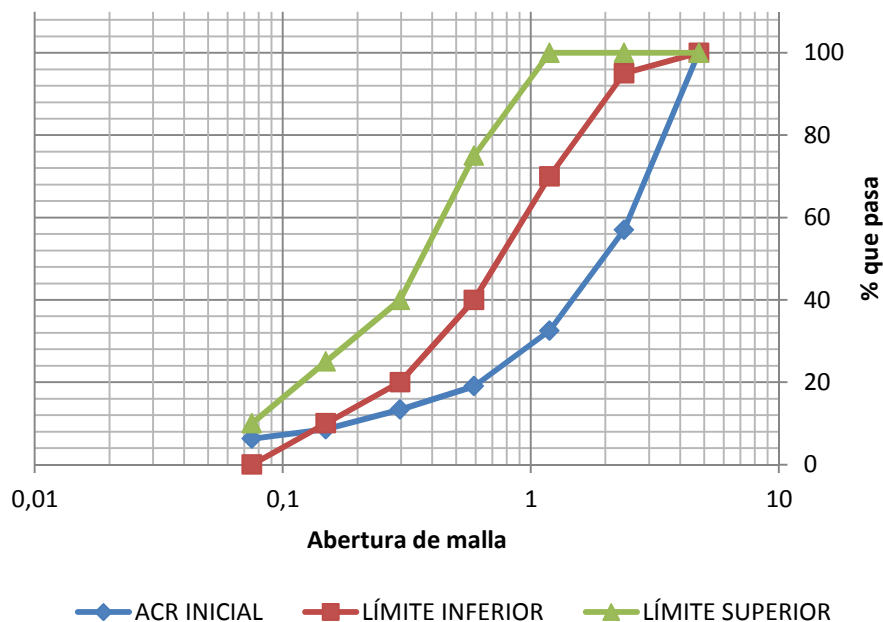
Se tamizará toda la ASN que se utilizará para amasar a través del tamiz No.30 y se conformará un árido con un 50% de contenido en partículas inferiores a ese tamiz y un 50% superiores.

Asimismo se deberá retirar toda aquella partícula superior al tamiz No.4, por no ser característica del uso en morteros.

ÁRIDO CERÁMICO RECICLADO (ACR)

Cabe destacar que el análisis granulométrico [Fig 2] del ACR resultó ser deficiente al no localizarse dentro de los parámetros que indica la NORMA C144-99 (14).

Fig 2. Análisis granulométrico ACR



Mediante el estudio de la curva granulométrica y los valores de densidad aparente proporcionados por el ensayo según la norma ASTM C29 (18), se decide diseñar una composición del material para conseguir mejores resultados en los ensayos del mortero, así como una compacidad correcta y una mayor similitud con la curva demandada por la norma ASTM C144-99 (14).

El ACR destinado a amasado, se deberá dividir mediante el tamiz No.30 como en el caso de la ASN, en este caso interesa incrementar la cantidad de partículas retenidas por el tamiz y reducir el material que pasa. Se decide crear una composición para el

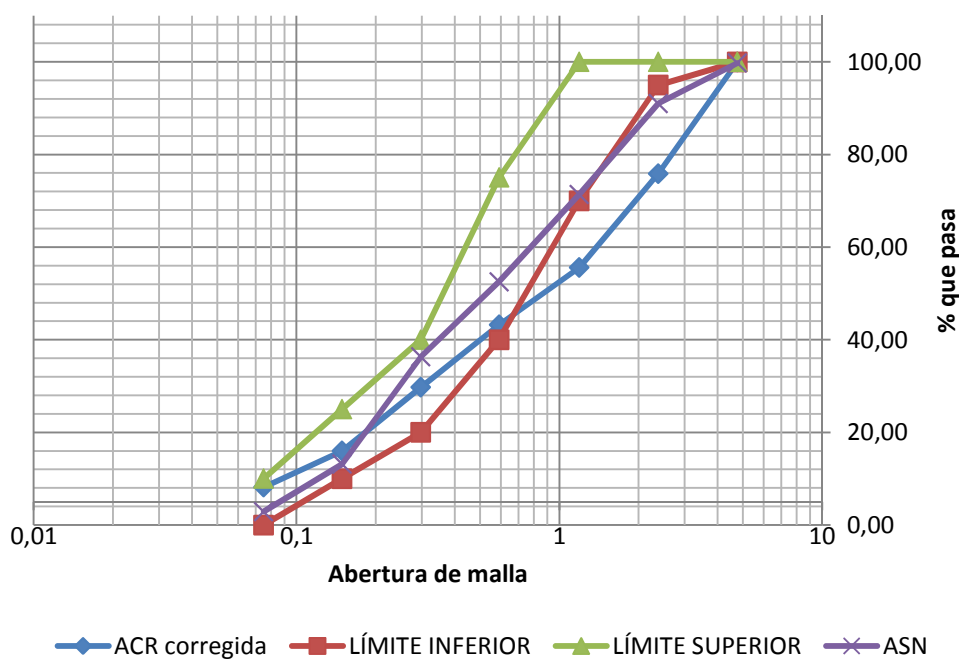
amasado formada por 60% de cerámica retenida por un 40% de la que pasa [Ilustración 5].



Ilustración 5. Tamices No. 4 y No. 30 con el árido retenido

Una vez realizada la modificación granulométrica se vuelve a ensayar el material [Fig 3], esta vez se aprecia una curva similar a la del material de referencia estableciendo así la referencia granulométrica definitiva para el ACR.

Fig 3. Nueva granulometría ACR



2.1.3.2 RESUMEN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ÁRIDOS

En la Tabla 2 se resumen los resultados principales de los ensayos de propiedades físicas realizados sobre los áridos utilizados en la mezcla.

En ésta se puede observar la variación entre los ensayos realizados antes y después del ajuste granulométrico. Cabe destacar que parece una densidad del ACR superior sobre la de ASN en la muestra original, pese a que el material es más poroso y menos denso, lo anterior se explica debido a la mayor cantidad de finos que ya nos revelaba la curva granulométrica. Combinando las conclusiones comentadas y los resultados de los análisis se decide el nuevo perfil granulométrico, que como se puede observar en el apartado d perfiles ajustados, acaba consiguiendo mayor similitud física con el árido de referencia.

Tabla 2. Propiedades físicas de los áridos

Propiedad	ACR	ASN
Originales		
Peso Volumétrico _{Aparente Seco} (Kg/m ³)	1860,8	1735,1
Peso Volumétrico _{Húmedo Superficialmente Seco} (Kg/m ³)	1402,4	1182,0
Contenido de Vacíos (%)	35,3	32,9
Con perfiles granulométricos ajustados		
Densidad _{seca} (Kg/m ³)	1820,9	2581,6
Densidad _{húmeda} (Kg/m ³)	2155,4	2623,6
Coeficiente de Absorción (%)	18,4	1,6
Módulo de Finura	2,8	2,4
Partículas < 75µm (No.200) (%)	8,2	2,9

2.1.4 CONGLOMERANTE

El conglomerante utilizado en el amasado de los morteros es un cemento portland Tipo I según la norma ASTM C150 (20). En este caso un CEM I 42,5 N/SR elaborado por Cementos Portland Valderrivas. Se ha optado por un portland Tipo I ya que es un cemento sin aditivos que pese a su alta resistencia temprana no añadirá ningún parámetro que pueda condicionar o alterar los resultados y las conclusiones que se puedan extraer para las mezclas no normalizadas.

Las características propias del cemento proporcionadas por el fabricante aparecen en la Tabla 3.

Tabla 3. Características técnicas del cemento

(fuente :Cementos Portland Valderrivas)

	Características del cemento	Norma	Habitual
Componentes*	Clinker (%)	95-100	96
	Caliza (L) (%)	-	4
	Regulador de fraguado. "yeso" (%)	-	5
Químicas	Trióxido de azufre (SO ₃) (%)	4,0 máx.	3,0
	Cloruros (Cl ⁻) (%)	0,10 máx.	0,01
	Perdida por calcinación (%)	5 máx.	3,0
	Residuo insoluble (%)	5 máx.	0,4
Físicas	Expansión Le Chatelier (mm)	10 máx.	0
	Tiempo de inicio de fraguado (minutos)	60 mín.	160
	Tiempo de final de fraguado (minutos)	-	210
	Superficie específica Blaine (cm ² /g)	-	3.500
Mecánicas	Compresión a 1 día (MPa)	-	20
	Compresión a 2 días (MPa)	20 mín.	31
	Compresión a 7 días (MPa)	-	43
	Compresión a 28 días (MPa)	42,5-62,5	57

2.1.5 AGUA DE AMASADO

El agua de amasado utilizada proviene de la red de abastecimiento pública del área metropolitana de Barcelona. Se utilizará a temperatura ambiente.

La composición del agua se muestra en la Tabla 4:

Tabla 4. Composición química del Agua de Barcelona

(Fuente: Aigües de Barcelona)

Parámetro	Mediana	Mínimo	Máximo	Unidades
Temperatura	17.8	7.1	31	°C
PH	7.45	7.12	8.32	unidades PH
Conductividad	1570	1000	2283	μS/cm
Cloruros	298	155	450	mg Cl/l
Sulfatos	207	113	302	mg SO ₄ /l
Calcio	127.9	73.3	162.5	mg Ca/l
Magnesio	41.9	16.9	62.1	mg Mg/l
Sodio	168.9	90	252.7	mg Na/l
Potasio	31.9	14.5	42.2	mg K/l
Dureza Total	483	245	662	mg CaCO ₃ /l
Nitratos	13.74	7.64	25.1	mg NO ₃ /l
Fluoruros	0.18	0.13	0.25	mg F/l
Bicarbonatos	282	195	433	mg HCO ₃ /l
Alcalinidad	231	160	355	mg CaCO ₃ /l

2.2 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

2.2.1 DOSIFICACIÓN

La dosificación es el elemento central alrededor del cual gira esta investigación. La intención es evaluar cuál es el porcentaje de sustitución máximo al que se puede llegar, manteniendo unas propiedades óptimas del mortero, para que éste sea apto para el trabajo según normativa ASTM.

Para ello se han elegido unas dosificaciones árido/cemento básicas que se dividen en dos ramas: 1:3.25, será la dosificación con mayor contenido de cemento y 1:4.75, que será la dosificación más magra. De esta forma se apreciará de forma más clara el efecto de la sustitución del árido.

Para cada una de las dosificaciones de A/C, se realizarán las probetas necesarias para el estudio del material base a 3, 7, 28, 60 y 90 días. Se deberá hacer lo mismo para cada porcentaje de sustitución que en este caso se ha decidido que sean del 10%, 20%, 30%, 50% y 100% de la fracción de árido del mortero. El remplazo progresivo se realizará cambiando parte del agregado normalizado (ASN) por material cerámico reciclado previamente ajustado granulométricamente (ACR), hasta que la sustitución del árido normalizado sea total y obteniendo un mortero elaborado exclusivamente con árido cerámico. La sustitución porcentual se realizará mediante equivalencia de peso, se prevé por tanto una variación de volumen añadida en función del porcentaje de sustitución, ya que la densidad del ACR es menor que la de la ASN.

Otro factor a tener en cuenta es la cantidad de agua de amasado que van a requerir las nuevas mezclas con que contengan agregado ACR. Puesto que no se trata de un árido de uso común no hay parámetros que nos indiquen cuáles son las cantidades de agua por dosificación óptimas. Además el material de sustitución en este caso es claramente mucho más poroso.

Se toman de inicio la proporción agua/cemento como 0.5 pero esta se deberá ajustar al cumplimiento de los parámetros que marca la normativa ASTM C109-05 (21) para el amasado. Por tanto será la prueba de la mesa de fluidez del mortero fresco la que dictamine si la fluidez del mortero es la óptima o es necesario repetir el amasado y variar la cantidad de agua añadida.

En la Tabla 5 y Tabla 6 aparecen los valores finales de los elementos usados en cada mezcla según su dosificación. Nombraremos a las mezclas dependiendo de la relación árido cemento:

- Para las de la dosificación 1:3,25 llamaremos N3,75 a la mezcla de referencia elaborada con un 100% del contenido de árido en ASN; las mezclas que contengan ACR se nombrarán C1, C2, C3, C4, C5 según los porcentajes de reemplazo especificados en la Tabla 5.
- Para las de la dosificación 1:4,75 llamaremos N4,75 a la mezcla de referencia elaborada con un 100% del contenido de árido en ASN; las mezclas que contengan ACR se nombrarán C11, C12, C13, C14, C15 según los porcentajes de reemplazo especificados en la Tabla 6.

Tabla 5. Composición mezclas de dosificación 1:3,25

Dosificación 1 : 3,25	N3,25	C1	C2	C3	C4	C5
Material (g)	Nivel de remplazo de árido cerámico reciclado (ACR)					
	r=0.00	r=0.10	r=0.20	r=0.30	r=0.50	r=1.00
Agua Inicial	247.80	301.2	372.98	372.98	397.5	415.93
Agua Final	337.80	371.2	432.98	417.98	477.5	460.73
Cemento	495.60	495.60	495.60	495.60	495.60	495.60
ASN	1610.70	1451.60	1288.56	1127.00	805.00	0.00
ACR	0.00	161.00	322.14	483.20	805.00	1610.70
Ag/cem	0.68	0.75	0.87	0.84	0.96	0.92
No. Probetas	24	24	24	24	24	24

Como se puede apreciar la relación agua/cemento incrementa a medida que aumenta la proporción de remplazo de la ASN por el ACR. Es obvia la avidez del árido reciclado así como el aumento proporcional del volumen puesto que este es menos denso.

En la siguiente tabla la relación agua/cemento es mucho mayor ya que la mezcla es mucho más magra que la anterior y requiere de más contenido de agua para cumplir con los resultados de escurrimiento en la mesa de flujo.

Tabla 6. Composición mezclas de dosificación 1:4,75

Dosificación 1 : 4,75	N4,75	C11	C12	C13	C14	C15
Material (g)	Nivel de remplazo de árido cerámico reciclado (ACR)					
	r=0.00	r=0.10	r=0.20	r=0.30	r=0.50	r=1.00
Agua Inicial	299.50	271.50	325.00	370.00	375.00	526.00
Agua Final	379.55	351.5	385.00	400.00	450.00	590.00
Cemento	339.50	339.50	339.50	339.50	339.50	339.50
ASN	1610.70	1451.60	1288.56	1127.00	805.00	0.00
ACR	0.00	161.00	322.14	483.20	805.00	1610.70
Ag/cem	1.12	1.04	1.13	1.17	1.33	1.73
No. Probetas	24	24	24	24	24	24

2.2.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS

Para la correcta fabricación de las probetas se tuvieron en cuenta los siguientes factores.

El análisis granulométrico del ACR destacó por tener un alto contenido de fracción gruesa en relación a la fracción fina de las muestras tomadas. La solución tomada se basa en reducir el contenido de fracción gruesa y aumentar la proporción de fracción fina para conseguir una consistencia granulométrica más acertada.

Para ello el árido requerido para cada amasado debía de secarse mediante estufa durante un mínimo de 24 horas para después ser tamizado con el fin de realizar la corrección. Se usó el tamiz ASTM No.30 para dividir el árido en dos fracciones: gruesa y fina, delimitando la curva granulométrica en dos partes iguales. Con el fin de compensar la diferencia entre las dos fracciones se decidió tomar por cada 100% de ACR un 40% del material que no pasaba por el tamiz o grueso y un 60% del fino o que pasaba por el tamiz.

Asimismo también se secó y separó la arena en dos partes mediante el mismo tamiz del No.30, para regularizar la granulometría en todos los ensayos. En este caso la proporción de la mezcla final era de 50% fracción menor al tamiz No.30 y 50% fracción superior, sobre un total del 100%.

Las dosificaciones finales de cada material se irían alternando dependiendo de la dosificación requerida en cada amasado y el porcentaje de sustitución de cada muestra.

2.2.2.1 AMASADO

El amasado de las probetas se ha llevado a cabo tomando como referencia la norma ASTM C270-00 (22) que regula los morteros para fábricas.

Se realiza mediante amasadora [Ilustración 6] mecánica de dos velocidades, siguiendo el procedimiento especificado en la norma ASTM C305-06 (23). Las proporciones de la mezcla son las que aparecen en la Tabla 5 y Tabla 6, pesadas con báscula electrónica de precisión 0.1g [Ilustración 7].

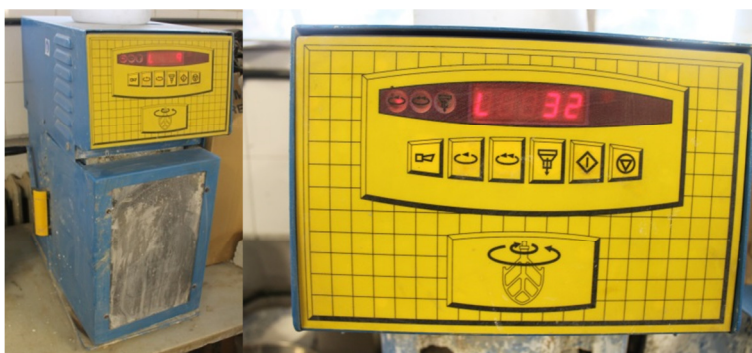


Ilustración 6. Amasadora Matest



Ilustración 7. Báscula de amasado y saturación previa del árido



Ilustración 8. Detalle de proceso de amasado y mortero finalizado

La incorporación del agua de amasado en los morteros que contienen ACR se realizará directamente sobre el árido antes de incorporar el cemento [Ilustración 7], buscando conseguir que éste quede bien húmedo. De lo contrario se podría producir una falsa hidratación de la mezcla y que por averse los poros del ACR absorbieran el agua de amasado, alterando la hidratación del cemento y su fraguado [Ilustración 8].

DETERMINACIÓN DEL AGUA DE AMASADO Y CONSISTENCIA

Como se ha comentado con anterioridad, el agua de amasado se registrará por la necesidad que tenga cada amasado, que dependerá de la dosificación y del porcentaje de sustitución de árido reciclado. Para normalizar la consistencia del mortero se realizan pruebas de cada amasado en la mesa de flujo [Ilustración 9] según la norma ASTM C230 (24).

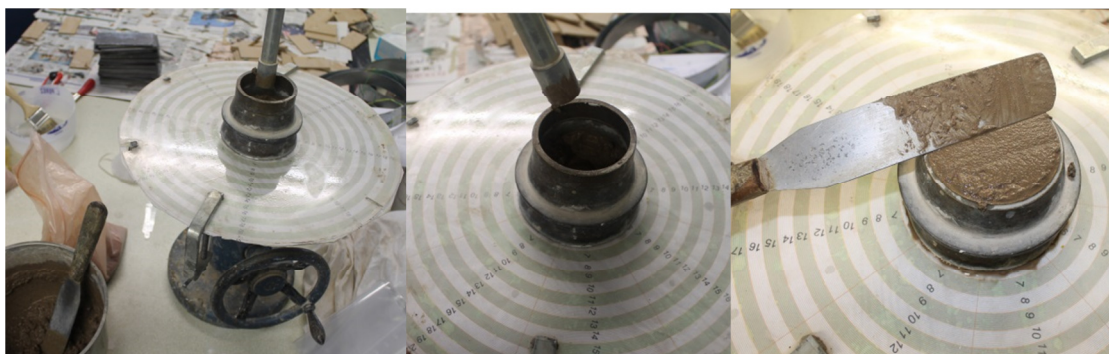


Ilustración 9. Proceso de ensayo en mesa de flujo

Dado que cada dosificación distinta de mortero requerirá cantidades de agua de amasado distintas, se impone como condición, que cada amasado reúna las condiciones de escurrimiento requeridas por el ensayo, de un $110\% \pm 3$ de escurrimiento una vez realizados los 20 golpes. Así se consigue referenciar la dosificación de agua y apreciar las variaciones que corresponden a cada amasado dependiendo de los porcentajes de sustitución [Ilustración 10].

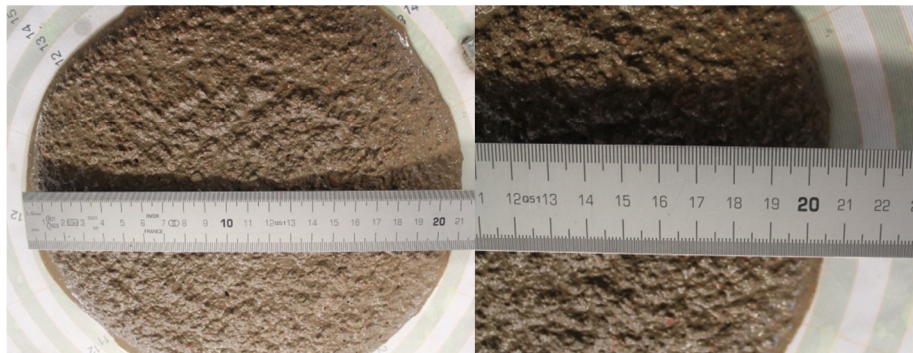


Ilustración 10. Detalle de resultado final de escurrimiento según norma aplicada

Las comprobaciones en la mesa de flujo se irán repitiendo durante el amasado hasta conseguir la consistencia deseada. Las variaciones entre el contenido de agua inicial de la mezcla y el contenido final recogidos en la Tabla 5 y Tabla 6 marcan la diferencia entre: el agua que requiere por proporción de cemento según la dosificación (inicial) y la que ha sido necesaria (final) hasta conseguir la consistencia de la mezcla. Esta será la referencia a consultar para definir la avidez de la mezcla dependiendo de su composición.

Se deberá amasar suficiente material de cada dosificación para las probetas que requieran los ensayos a realizar. Las medidas y cantidades de las probetas que se han moldeado son las mostradas en la Tabla 7 siguiente.

Tabla 7. Relación de ensayos, norma ASTM, tipo y cantidad de probetas y fechas de ensayo.

ENSAYO	NORMA	DIMENSIONES PROBETA (mm)	Uds. Por ensayo	EDADES de ENSAYO (días)	TOTAL Uds.
Módulo de Elasticidad Dinámico MOE _D	ASTM 597 (25) (12)	40 x 40 x 160	3	3, 7, 28, 60, 90	18
Resistencia a flexotracción y compresión	ASTM C348 (26) ASTM C349 (27)				
Densidad, porosidad por adsorción	UNE-EN 1012-12			60 días	
Retracción por secado	ASTM C490 (25)	25 x 25 x 285	3	3,7, 14,28,40,60, 80,90	6

ENMOLDADO, REFERENCIADO Y CURADO DE LAS MUESTRAS

Una vez se consigue la consistencia deseada del mortero se procede a moldear las muestras. El moldeado se realizará en moldes normalizados reutilizables de acero en dos fases [Ilustración 11, Ilustración 12].



Ilustración 11. Molde normalizado de 25 x 25 x 185mm con sus pernos

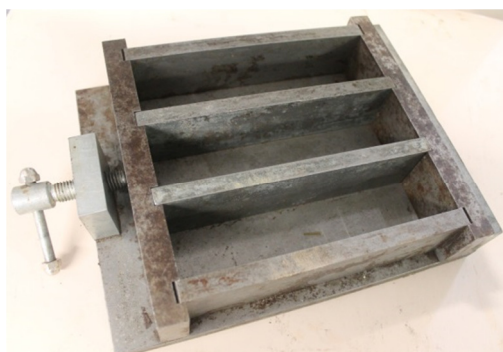


Ilustración 12. Molde de 40 x 40 x 160mm

Primero se rellenan los moldes hasta la mitad y se realiza un vibrado de 5 segundos con una mesa de vibrado [Ilustración 13], posteriormente se rellenan por completo y se realiza un segundo vibrado, finalmente con la ayuda de una paleta se enrasan controlando que no hayan quedado bolsas de aire ocluido ni cavidades; se debe dejar la parte superior de los moldes en contacto con el ambiente lo más lisa posible para evitar porosidades.



**Ilustración 13. Mesa vibradora (A), display mesa vibradora (B),
detalle molde después del vibrado**

Las muestras se curaran en cámara húmeda a una temperatura de $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ y con una humedad relativa mínima del 90% según la norma ASTM C31 (29), allí permanecerán un día para poder ser desmoldadas. Una vez desmoldadas se procederá a la identificación de las probetas para su posterior referencia.

Las probetas de 25 x 25 x 285 mm destinadas a las pruebas de retracción por secado se mantendrán hasta los 28 días de edad en la cámara húmeda diferenciadas en dos grupos de tres probetas para cada amasado, un grupo se aislará del efecto ambiente mediante parafina y envueltas en estaño laminado. Una vez pasado el período de curación de 28 días continuaran su proceso de curado fuera de la cámara, en el laboratorio, para poder estudiar su evolución en condiciones ambientales hasta los 60 días.



Ilustración 14. Detalle cámara húmeda y tanque de inmersión

Las probetas de 40 x 40 x 160 mm destinadas el resto de ensayos se curaran por inmersión en el tanque dispuesto en la misma cámara, se mantendrán inmersas en agua hasta el día de ensayo [Ilustración 14]. La intención al elegir esta forma de curado es la de evitar la dispersión de las condiciones ambientales, humedad / temperatura y generar un ambiente común para todas las mezclas.

2.3 ENSAYOS DEL MORTERO ENDURECIDO

2.3.1 RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN Y A COMPRESIÓN DE PROBETAS PRISMÁTICAS DE MORTERO ENDURECIDO

Para realizar estos ensayos se ha seguido el procedimiento indicado por la norma ASTM C349 (27).

Se utilizarán tres probetas de cada dosificación para cada fecha de ensayo a lo largo de los 90 días de duración del estudio. Los ensayos se realizaran una vez transcurridos 3, 7, 28, 60 y 90 días después de su amasado. Mientras tanto habrán permanecido en curado por inmersión como se ha detallado.

Estas mismas probetas serán las utilizadas para realizar los análisis de MOE_D , mediante la propagación de ondas sonoras así como por propagación de ultrasonido. Se usaran también una vez rotas en el análisis de flexotracción para el análisis a compresión simple, como indica la norma ASTM C349-77 (30).

ANÁLISIS A FLEXOTRACCIÓN

Para el análisis a flexotracción se usará una prensa eléctrica con células de lectura con capacidad de 3T y 5T con el dispositivo de utillaje específico formado por tres cilindros de apoyo para aplicar una carga a flexotracción.

La medición de la carga resistida se realizará a través de un lector conectado a la célula de carga, este nos permitirá ver la evolución de la carga y guardará la lectura máxima producida antes de la rotura.

La velocidad de carga de la prensa será de 10N/s a 50N/s para que la rotura de la probeta se produzca en un tiempo de entre unos 30 y 90 segundos. Colocando la probeta de forma centrada para que el eje de carga central recaiga en el centro longitudinal de la probeta buscando conseguir una flexión perfecta.

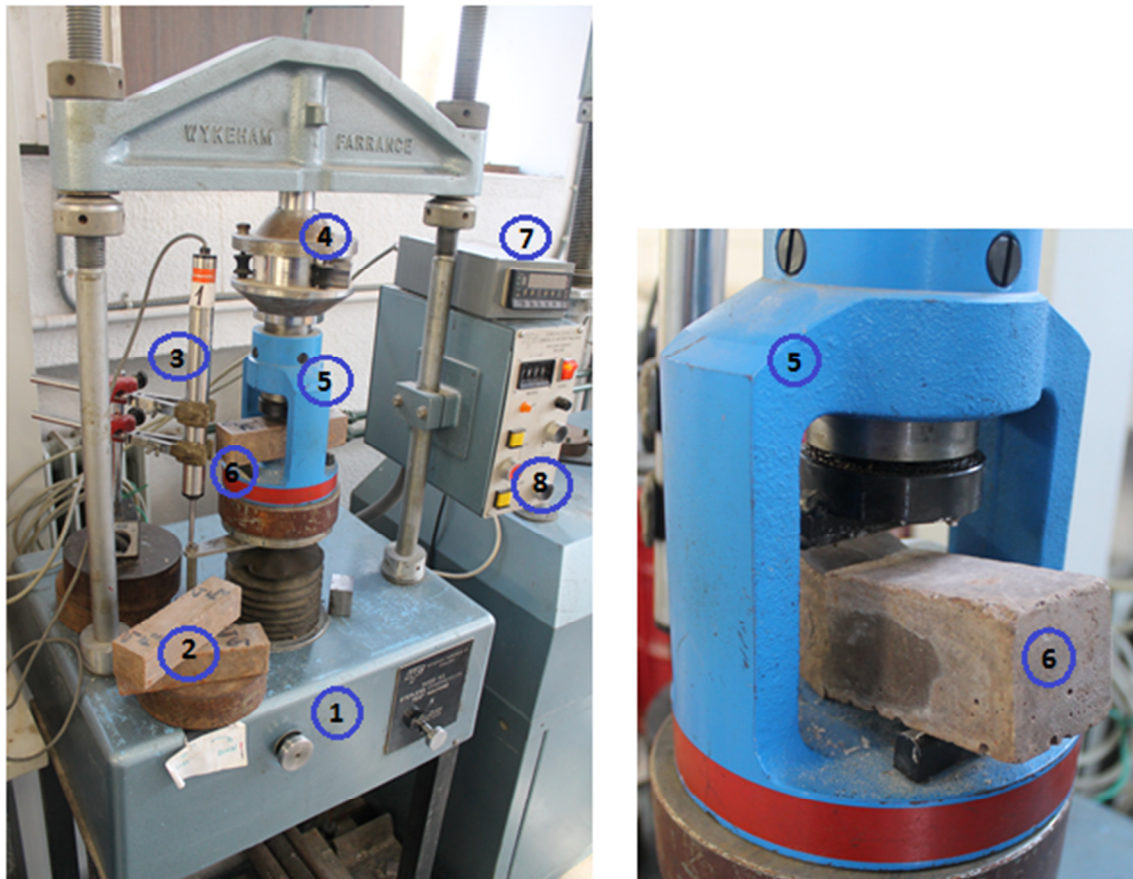


Ilustración 15. Prensa mecánica preparada para el ensayo de flexotracción, detalle del utillaje y probeta ensayada

1. Prensa mecánica para ensayo estático de resistencia a las cargas.
2. Grupo de probetas dispuestas para ensayar.
3. Galga extensométrica para medir la deformación del material al producir la carga.
4. Célula de lectura para las cargas aplicadas.
5. Utillaje específico para el ensayo de flexotracción de probetas prismáticas.
6. Probeta colocada para ser ensayada
7. Dispositivo de lectura del resultado de las cargas aplicadas.
8. Panel de control eléctrico de la prensa mecánica, aquí se programa la velocidad de carga.

La medición de la carga resistida se realizará a través de un lector conectado a la célula de carga, este permite ver la evolución de la carga y guardará la lectura máxima producida antes de la rotura. La velocidad de carga de la prensa será de 10N/s a 50N/s para que la rotura de la probeta se produzca en un tiempo de entre unos 30 y 90 segundos. Colocando la probeta de forma centrada para que el eje de carga central recaiga en el centro longitudinal de la probeta buscando conseguir una flexión perfecta.

Se aprovecharán, en caso que sea posible, los ensayos de resistencia a carga de las probetas para determinar el Módulo de Elasticidad Estático (MOE_E) de los morteros según las distintas dosificaciones y su evolución en el tiempo.

Para ello, se conectará una galga extensométrica en el dispositivo de utillaje que medirá la deformación de la pieza ensayada, así junto con la lectura de carga por segundo que proporciona la célula, permitirá conocer la gráfica de tensión deformación del material. Una vez obtenida dicha gráfica, se podrá extraer el MOE_E así como el Trabajo acumulado por la fuerza de flexotracción.

ANÁLISIS A COMPRESIÓN

Con una de las dos partes en que queda dividida la probeta después del ensayo a flexotracción se realizará el ensayo a compresión.

Se utilizarán los mismos dispositivos que en el ensayo anterior sustituyendo el utillaje para el análisis de flexotracción por el de compresión, formado por dos superficies paralelas de 40 x 40 x 160 mm que coinciden perfectamente con las dimensiones la probeta.

En este caso se realizará también, de forma simultánea, la lectura de deformación para el estudio del MOE_E en función del esfuerzo a compresión.



Ilustración 16. Detalle del utillaje del análisis de compresión

y detalle de fallo de la probeta

2.3.2 ANÁLISIS DEL MÓDULO ELÁSTICO DINÁMICO (MOE_D) MEDIANTE FRECUENCIA DE ONDAS SONORAS

Para realizar este análisis se han seguido los parámetros fijados tanto en el artículo de los profesores J. R. Roselló, I. R. Cantalapiedra 2010 (31), y como en la norma ASTM E1876-01 (32).

El módulo de Young dinámico se determina utilizando la frecuencia de resonancia de los modos de vibración tanto flectora como longitudinal. Ambos se encontrarán en función del coeficiente de Poisson del material y la velocidad a la que se transmita la onda sonora.

Para determinar el módulo de Young se deberá obtener el peso de la probeta mediante una báscula de precisión 0.01g y con la ayuda de un pié de rey se deberán obtener las dimensiones volumétricas de la probeta, para hallar la densidad aparente de cada de cada tipo de mortero [Ilustración 17].

Se colocará la probeta sobre dos apoyos aislantes según se indica para proteger a la probeta de las vibraciones exteriores, usaremos un elemento percutor para producir una vibración mediante un suave golpeo de la pieza; la vibración será recogida mediante un micrófono situado a 3mm del extremo de la probeta [Ilustración 18].

A partir del valor de la frecuencia fundamental de resonancia obtenemos la velocidad de pulsación, que dividida por la densidad nos permite obtener el valor del MOE_D .

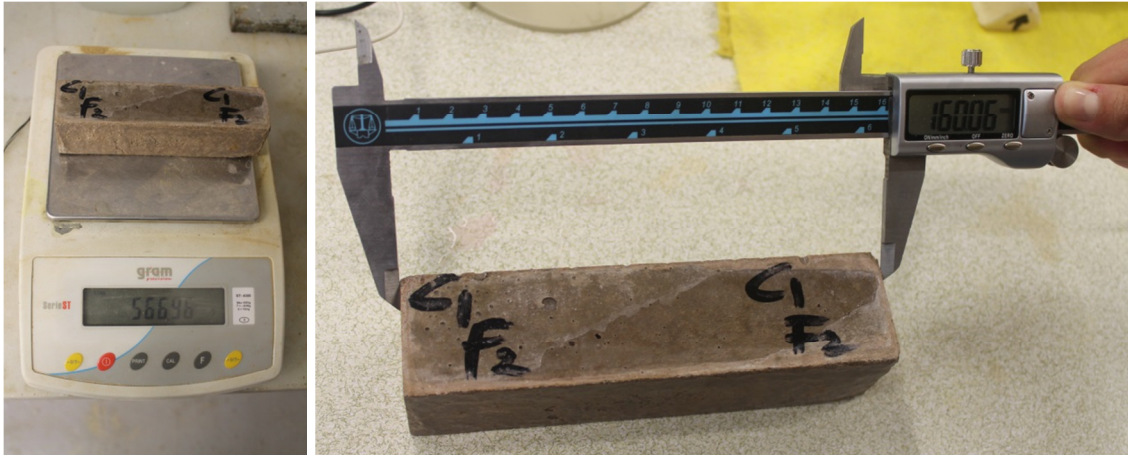
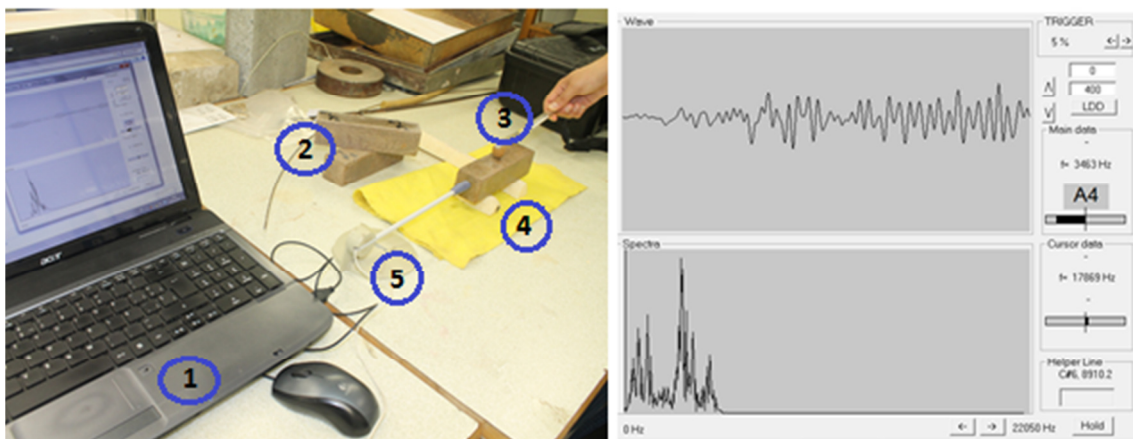


Ilustración 17. Báscula de precisión y pie de rey para determinar la densidad aparente de las probetas



**Ilustración 18. Dispositivo de ensayo para el MOE dinámico
y detalle del software de lectura**

1. Ordenador portátil con software FFT Analyser para procesar las lecturas de pulsaciones.
2. Grupo de probetas dispuestas para el ensayo.
3. Percutor ligero con cabeza de madera.
4. Gamuza de aislamiento y apoyos aislantes sintéticos.
5. Micrófono encargado de recoger las ondas sonoras.

El valor utilizado como frecuencia de resonancia es el valor medio de seis lecturas obtenidas consecutivamente con una diferencia máxima entre ellas del 1%. El cálculo de los valores de frecuencia se realiza mediante un ordenador que registra la velocidad de pulsación que traduce a través del software específico.

Si los golpes se realizan de forma axial en función de la longitud de la probeta se calcularán como MOE_{long} , por tanto si el golpeo se realiza de forma transversal a la probeta se le llamará MOE_{flex} .

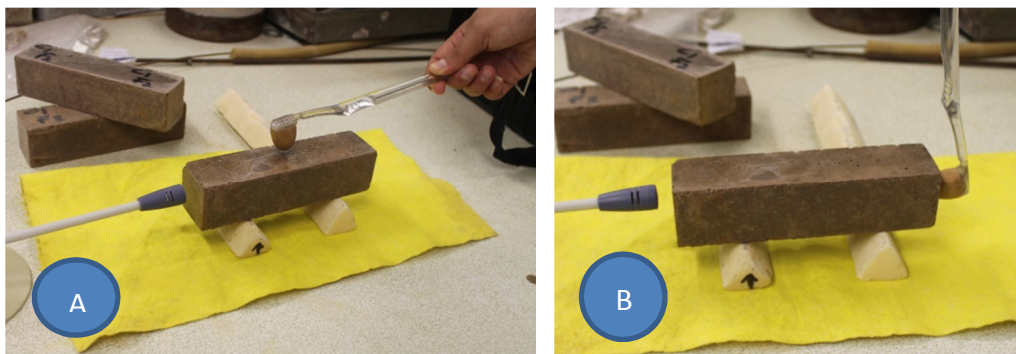


Ilustración 19. Formas de golpeo para MOE flexión (A) y para MOE longitudinal (B)

2.3.3 ANALISIS DEL MÓDULO ELASTICO DINÁMICO (MOE_D) MEDIANTE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDOS

Para esta determinación se ha utilizado un equipo de emisión-recepción de ultrasonidos C368 de “Matest”, provisto de palpadores de contacto receptor-transmisor de 55 kHz.

La prueba es muy similar a la del módulo elástico, se realiza un pesaje de las muestras y una vez conocida la densidad de éstas se calcula el módulo elástico en función de los datos recogidos por el lector de velocidad de propagación de ultrasonido. El equipo realiza lecturas al poner en contacto los palpadores, emisor y receptor con las caras de los extremos de la probeta mediante un gel de pH neutro. El valor de este análisis podrá ser comparado con la lectura longitudinal del ensayo anterior por ser una forma distinta de encontrar la misma capacidad del material. Se intenta reducir el margen de error que se puede producir en los ensayos de una misma probeta (Ilustración 20).

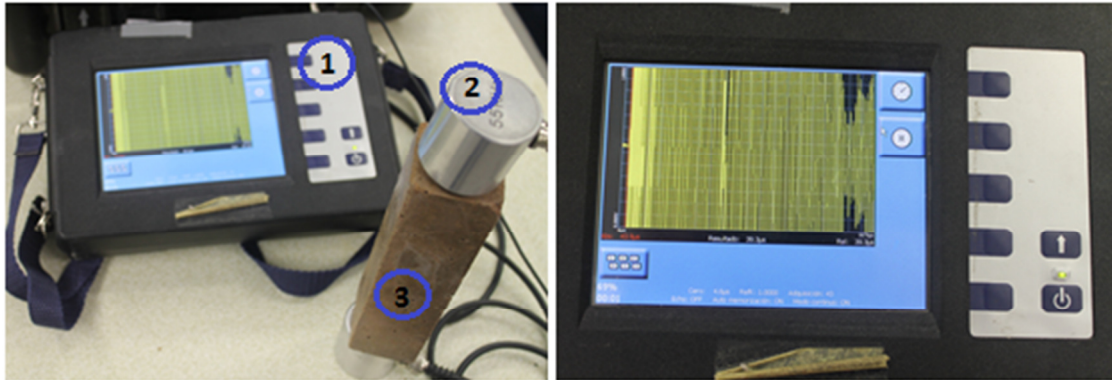


Ilustración 20. Ensayo de MOED por ultrasonidos

y detalle de dispositivo de lectura de frecuencias.

1. Dispositivo de lectura de frecuencias de ultrasonido conectado a los palpadores.
2. Palpador en contacto con la probeta a ensayar mediante gel de pH neutro.
3. Probeta dispuesta para el ensayo de MOE_D mediante ultrasonidos.

2.3.4 ENSAYO DE RETRACCIÓN POR SECADO

Se ha realizado este ensayo mediante las indicaciones de la norma ASTM C531.

Las probetas que tienen unas dimensiones de 25 x 25 x 285 mm, se han curado hasta transcurridos 28 días después de su amasado, posteriormente han continuado su evolución en condiciones ambientales. Las probetas utilizadas son más esbeltas con la intención de evidenciar de forma más notable la variación dimensional longitudinal [Ilustración 21].

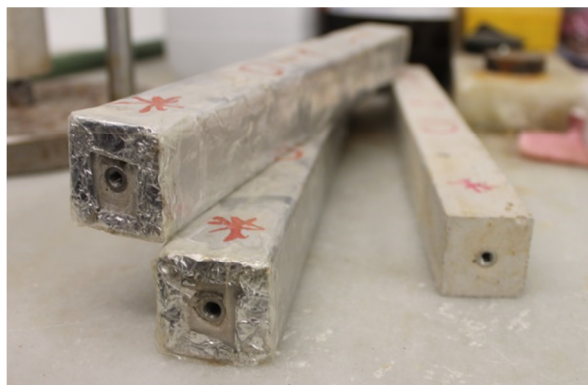


Ilustración 21. Detalle de probetas de retracción selladas para su aislamiento y probeta sin aislar con sus pernos de lectura

Para cada dosificación distinta se realizan seis probetas, tres de las cuales se encuentran aisladas selladas para evitar la pérdida del agua de amasado así como la absorción o pérdida de humedad en función de las condiciones de ambientales.

Cada probeta lleva incorporado des del amasado un perno de calibración, mediante este elemento se afianza un punto regular desde donde tomar las medidas progresivas de la longitud de la probeta, para encontrar la progresión de la evolución longitudinal y volumétrica. Las probetas utilizadas son más esbeltas con la intención de evidenciar de forma más notable la variación dimensional longitudinal.

Para la medición se usa un comparador de variación longitudinal, que debe reunir las condiciones según la norma ASTM C490, primero se realizará una lectura de referencia con una galga y a partir de esta se referenciaran las lecturas realizadas sobre cada probeta. Se deberán recoger tres lecturas por espécimen que as su vez serán seis por cada dosificación. La progresión de los datos nos dará una lectura de la reducción del volumen en función de la pérdida de agua y consecuente retracción del mortero.

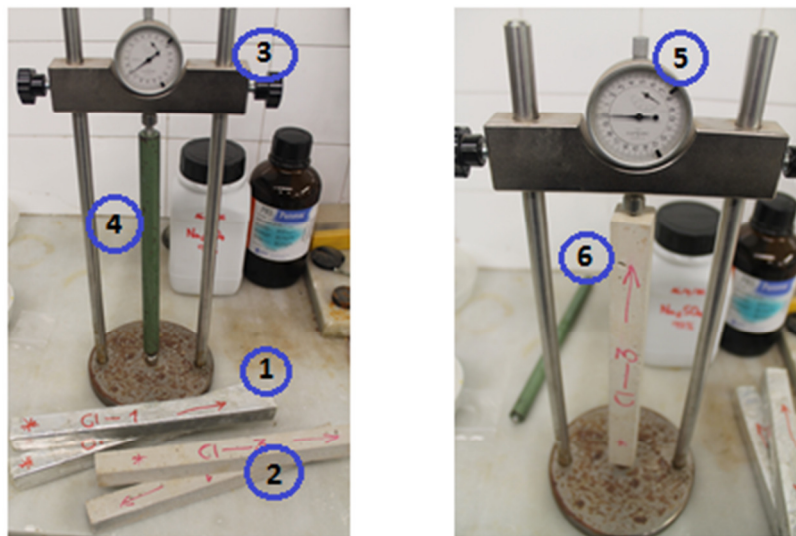


Ilustración 22. Medición de la variación longitudinal de las probetas para el ensayo de retracción por secado

1. Probetas selladas con parafina y aisladas con estaño laminado.
2. Probetas sometidas a condiciones ambientales.
3. Comparador de variación longitudinal.
4. Galga para fijar la lectura inicial o cero.
5. Indicador de lectura con precisión de 0,001 mm.

Finalmente se recogerán dos series de lecturas diferenciadas:

La primera estudiará el progreso de la probeta en la cámara húmeda durante su curado, las lecturas se harán cada día desde el desmolde hasta que cumple 28 días.

El segundo seguimiento se realizará a partir de que las probetas se encuentran en condiciones ambientales, las lecturas se iniciaran a partir del 28 día de desmolde hasta cumplir 90. A medida que el material se estabiliza las lecturas serán más esporádicas. Será importante, también, llevar el registro de la temperatura y el porcentaje de humedad ambiente de las probetas en el momento de la lectura.

2.3.5 DENSIDAD APARENTE Y RELATIVA DEL MORTERO ENDURECIDO. ÍNDICE DE POROSIDAD

Mediante este ensayo se pretende encontrar los valores de densidad aparente (D_A) y la densidad relativa (D_R) de las distintas mezclas de mortero.

Mediante el ensayo podremos determinar cuál es el tanto por ciento de poros o índice de porosidad accesible que contiene el mortero, también permitirá establecer si las redes de poros que se han formado son continuas o independientes. Esto se consigue secando las muestras y saturando después sus redes porosas bajo inmersión en agua en una campana de vacío. Para llevar a cabo este ensayo se han seguido un método alternativo que complementa el marcado por la norma UNE- EN 1015-12 (33). No se ha realizar el estudio mediante la norma ASTM C642 (34) por cuestiones prácticas, ya que las herramientas del laboratorio en el que se ha realizado el estudio están diseñadas para la norma UNE.

Se analizaran tres muestras de cada mezcla de mortero a los 60 días de maduración. Las muestras se deberán secar en una estufa a $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta que la variación de masa sea inferior a 0,1 %.

Una vez secadas se extraerá su peso seco y se medirán las dimensiones de todas sus caras con un pie de rey para conocer su volumen y poder calcular su densidad de cálculo.

Cuando las probetas están referenciadas se introducen en la campana de vacío sumergidas en agua destilada. Este mecanismo producirá una presión de hasta 8 mbar que hará que el agua llene los poros conectados a la superficie exterior del material. El llenarse los poros el peso de las probetas incrementará y nos permitirá jugar con la variación de pesos para determinar la densidad.



Ilustración 23. Equipo de vacío para la saturación de la red porosa accesible

Al finalizar el proceso de llenado la red porosa accesible se pesaran las muestras en la báscula, se anotará el peso saturado de la probeta y el peso hidrostático por desplazamiento de volumen de agua.

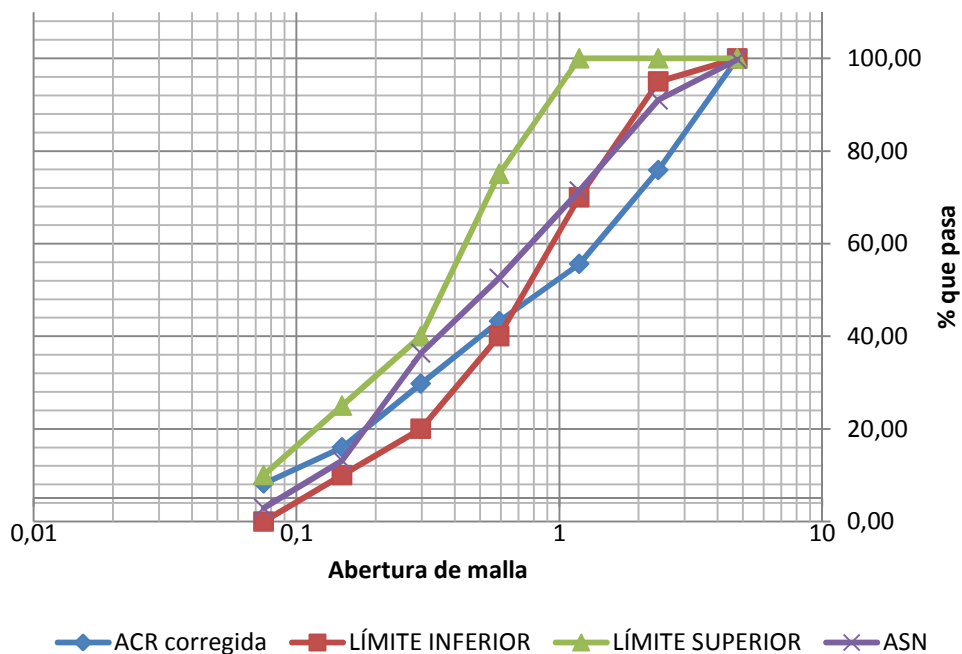
CAPÍTULO III. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS FINOS

3.1.1 CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS

Los resultados de las granulometrías se pueden explicar mediante el siguiente gráfico dónde aparecen las curvas características.

Figura 4. Nueva granulometría ACR



En ella se pueden apreciar las curvas granulométricas tanto del Árido Cerámico Reciclado (ACR), como de la Arena de Sílice Normalizada (ASN).

En este caso los datos del ACR son extraídos después de la corrección de su granulometría, pero de igual forma se puede apreciar la menor proporción del contenido de fracción gruesa o retenida en tamiz No.30.

La muestra de ASN en cambio dibuja una curva mucho más centrada entre los límites que establece la norma, aunque tampoco cumple con el límite inferior en porcentaje de partículas más gruesas.

3.1.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

En la siguiente Tabla 1 encontramos las características físicas principales extraídas de los ensayos marcados por la norma ASTM.

Tabla 8. Propiedades físicas de los áridos

Propiedad	ACR	ASN
Originales		
Peso Volumétrico _{Aparente Seco} (Kg/m ³)	1860,8	1735,1
Peso Volumétrico _{Húmedo Superficialmente Seco} (Kg/m ³)	1402,4	1182,0
Contenido de Vacíos (%)	35,3	32,9
Con perfiles granulométricos ajustados		
Densidad _{seca} (Kg/m ³)	1820,9	2581,6
Densidad _{húmeda} (Kg/m ³)	2155,4	2623,6
Coeficiente de Absorción (%)	18,4	1,6
Módulo de Finura	2,8	2,4
Partículas < 75µm (No.200) (%)	8,2	2,9

Al comparar los datos de los dos áridos se ve que el gran porcentaje de contenido en finos del material ACR provoca que su peso volumétrico sea mayor que el de la ASN.

En cambio el contenido de vacíos sigue siendo superior indicando que las partículas con un diámetro mayor son porosas y no ayudan a crear una buena compacidad.

Una vez se ha realizado el ajuste del perfil granulométrico, los valores que se pueden observar parecen más realistas en cuanto al comportamiento lógico que debe tener cada material. La densidad del ACR aparece menor que la de la ASN dada su porosidad, que a su vez también se puede relacionar esto con un mayor coeficiente de absorción.

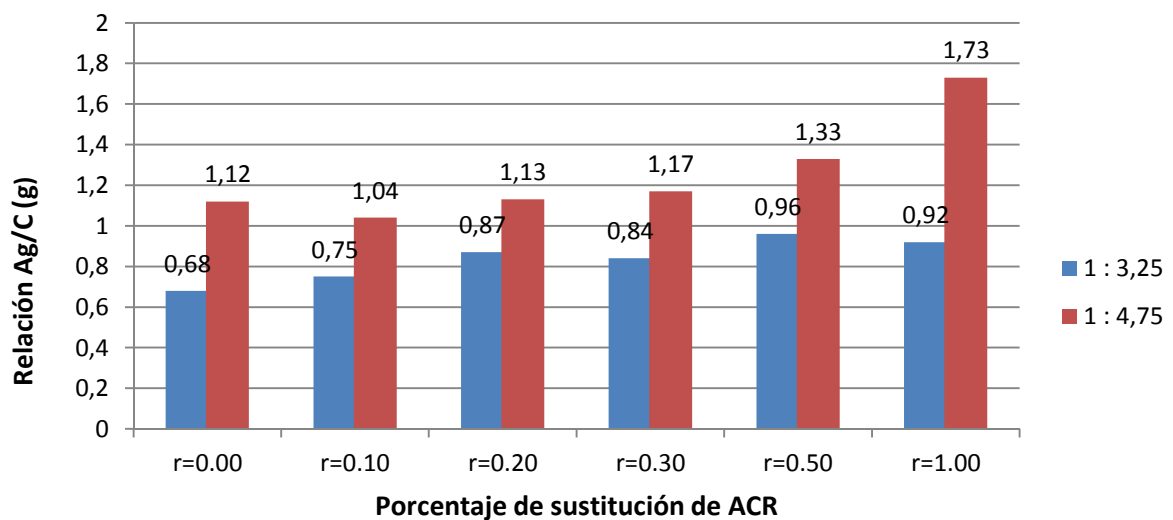
La cantidad de partículas finas así como el módulo de finura siguen apareciendo superiores y se entenderán como un hecho característico del material como se menciona en la investigación precedente J. Silva, J. de Brito, y R. Veiga 2010 (7).

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MORTEROS EN PASTA

Para la caracterización del mortero en pasta se ha utilizado la tabla de flujos con la intención de determinar la fluidez necesaria que debía tener el material amasado de cada mezcla.

A través del ensayo de la tabla de flujos se ha determinado la relación agua cemento de cada mezcla que es la que sigue [Fig 5]. Dónde los parámetros “r:” son los porcentajes de sustitución de ACR en cada mezcla y la comparación se realiza entre relaciones árido/cemento (p. ej.= 1:3,25).

Fig 5. Evolución de la relación Agua/Cemento respecto al porcentaje de sustitución



Se puede apreciar el incremento de la relación a medida que incrementa la sustitución del árido normalizado por árido cerámico, más poroso. Se confirma así la previsión de absorción que dictaban los análisis físicos de los áridos.

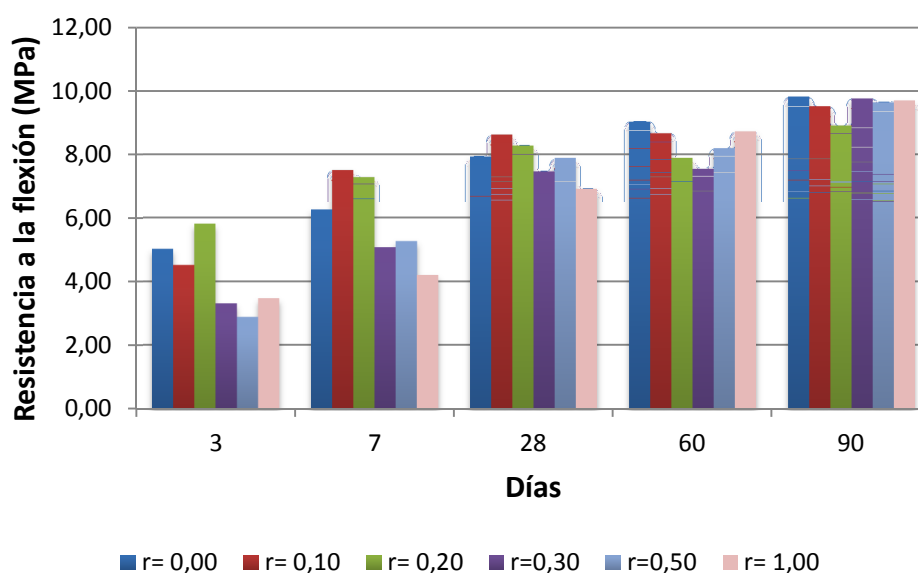
También se observa la mayor cantidad de agua que requieren las mezclas realizadas con la dosificación árido/cemento 1:4,75, la cantidad de cemento es menor y la mezcla es más seca, por tanto es necesario añadir más agua para conseguir la fluidez necesaria para el ensayo de escurrimiento.

3.3 CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO ENDURECIDO

3.3.1 RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN Y A COMPRESIÓN DE PROBETAS PRISMÁTICAS DE MORTERO ENDURECIDO

A continuación se analizarán los resultados de las propiedades de resistencia a la carga de las distintas mezclas. En estos se puede comparar la variación de las capacidades de resistencia en función del porcentaje de sustitución, así como de la edad de ensayo de cada muestra.

Fig. 6. Relación resistencias a Flexotracción para mezclas con dosificación 1:3,25 en función de la edad de ensayo



RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN

- DOSIFICACIÓN ÀRIDO/CEMENTO 1:3,25:

Como se presenta en la Fig. 6, la evolución de las capacidades de resistencia a flexotracción es creciente a medida que madura la muestra. En cambio es difícil establecer una evolución de la resistencia en función del porcentaje de sustitución a nivel general del ensayo, dada la variabilidad de los resultados.

Al analizar los resultados a 90 días, edad en la que se entiende que la evolución del mortero se ha estabilizado, se puede evidenciar que las diferencias de resistencia no son significativamente menores para las mezclas con ACR.

Destacar que los resultados más negativos serían para una sustitución del 20% del árido y que la sustitución total del árido de referencia por el árido reciclado presenta resistencias muy aceptables.

En la **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** se detalla la evolución de la capacidad resistente a Flexotracción del mortero en cada fecha de ensayo (f_m FLEX), el incremento de resistencia adquirido por la muestra en función de los períodos de días transcurridos entre diferentes edades de ensayo (Δf_m FLEX), el coeficiente de incremento de resistencia por día de cada período ($\Delta f_m/\text{día}$) y el porcentaje de variación de la resistencia a los 28 días de su amasado respecto a la de la muestra de referencia ($\% \Delta f_{mk} \sim f_{mkREF}$), muestra sin sustitución de árido reciclado.

Se aprecia que el mayor incremento de resistencia se produce en las edades más tempranas del mortero tanto en el de referencia (N3,25), como en $r=0,10$ y $r=0,20$ con sustituciones de 10% y 20% del árido respectivamente. Estas dos mezclas tienen también una resistencia a los 28 días superior a la de referencia, que se puede deber que tienen mayor capacidad de absorción del agua de amasado y provocan un fraguado del cemento más temprano. Cabe destacar que la variación porcentual de todas las mezclas, incluida la que tiene una sustitución del 100% de árido reciclado $r=1,00$, no varía más de un 10% respecto a la del N3,25.

Tabla 9. Evolución de la resistencia a Flexotracción para dosificación 1:3,25

MEZCLA	EDAD ENSAYO (días)	f_m FLEX. (MPa)	Δf_m FLEX. (MPa)	Δf_m /día (MPa/día)	% $\Delta f_{mk} \sim f_{mkREF}$ (%)
N 3,25 r=0%	3	5,02		1,67497582	100
	7	6,25	1,23	0,306621257	
	28	7,94	1,68	0,080196604	
	60	9,03	1,10	0,034323275	
	90	9,81	0,78	0,025933141	
C1 r=10%	3	4,52		1,507173142	108,77
	7	7,52	3,00	0,750535613	
	28	8,63	1,11	0,052737984	
	60	8,67	0,04	0,001144109	
	90	9,51	0,84	0,028068812	
C2 r=20%	3	5,81		1,937358189	104,27
	7	7,30	1,49	0,372979588	
	28	8,27	0,97	0,046200218	
	60	7,89	-0,38	-0,012013146	
	90	8,91	1,03	0,034170727	
C3 r=30%	3	3,31		1,104446716	94,12
	7	5,07	1,76	0,43933792	
	28	7,47	2,40	0,114192991	
	60	7,56	0,09	0,002860273	
	90	9,76	2,20	0,073222987	
C4 r=50%	3	2,86		0,954949784	99,42
	7	5,26	2,40	0,599513203	
	28	7,89	2,63	0,125089269	
	60	8,20	0,31	0,009724928	
	90	9,63	1,43	0,047594941	
C5 r=100%	3	3,48		1,159363956	87,31
	7	4,20	0,72	0,180769248	
	28	6,93	2,73	0,129883631	
	60	8,73	1,80	0,056347376	
	90	9,68	0,95	0,031729961	

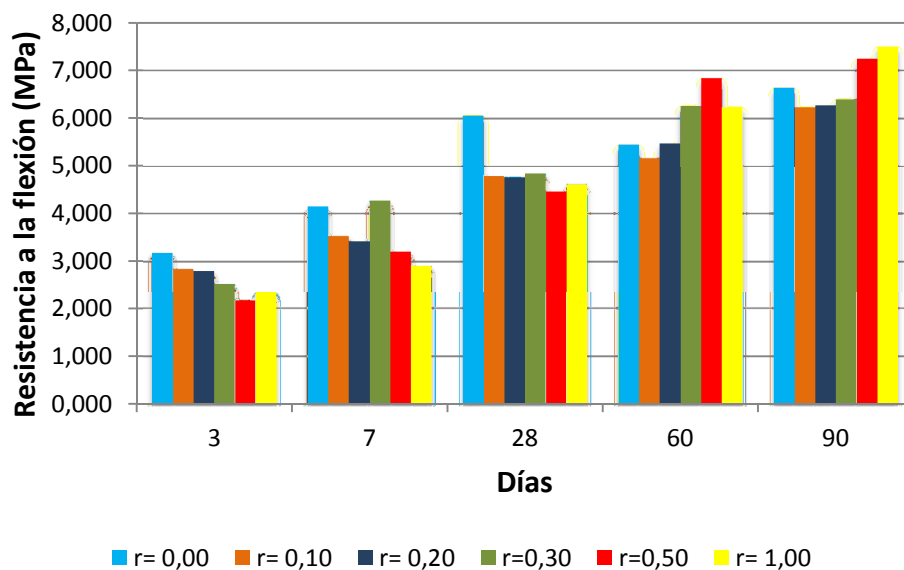
- DOSIFICACIÓN ÀRIDO/CEMENTO 1:4,75:

Para las muestras analizadas a Flexotracción con una dosificación árido/cemento de 1:4,75 los resultados de los ensayos han sido los que se muestran en la Fig. 7.

En ésta se aprecia una mayor resistencia del mortero de referencia $r=0,00$ hasta los 28 días después de su amasado, en cambio a partir de este momento son las mezclas con sustitución de ACR las que adquieren mayor resistencia. Esto se debe a que la influencia del cemento en los resultados es menor dada la dosificación, hecho que provoca menos interferencias ante el estudio de la función del árido y su porcentaje de sustitución en la mezcla. Investigaciones anteriores justifican la reacción mediante la porosidad y la capacidad de absorción del ACR, el agua de amasado se almacena en los poros del árido y se libera de forma más lenta permitiendo una evolución del material más prolongada.

Nuevamente, como en la anterior dosificación el material con un 100% de sustitución de ACR ha dado resistencias sorprendentemente altas comparadas con la referencia.

Fig. 7. Relación resistencias a Flexotracción para mezclas con dosificación 1:4,75 en función de la edad de ensayo



Como en la dosificación anterior, los datos de la evolución de los distintos morteros se presentan en la

Tabla 10. En ésta se puede observar un comportamiento de los morteros en función de su maduración similar al de la dosificación 1:3,25.

Los mayores incrementos de la capacidad resistente se producen hasta los 28 días después del amasado, aunque las mezclas con sustitución de ACR continúan una evolución progresiva mientras que la mezcla de referencia 4,75 N se estanca, fenómeno que se explica mediante la liberación progresiva de la humedad retenida en el árido.

Se consigue así que finalmente los mejores resultados de resistencia temprana sean para las dosificaciones $r = 0,20$ y $r = 0,30$ (20% y 30% de sustitución de ACR respectivamente), pero que al finalizar el período de ensayos a los 90 días sean las mezclas $r = 0,50$ y $r = 1,00$ (50% y 100% de sustitución de ACR respectivamente) las que resulten con una capacidad resistente mayor, mayor incluso que la mezcla de referencia, concretamente un 28% más resistentes sometidas a una carga estática mediante esfuerzo de flexotracción.

Tabla 10. Evolución de la resistencia a Flexotracción para dosificación 1:4,75

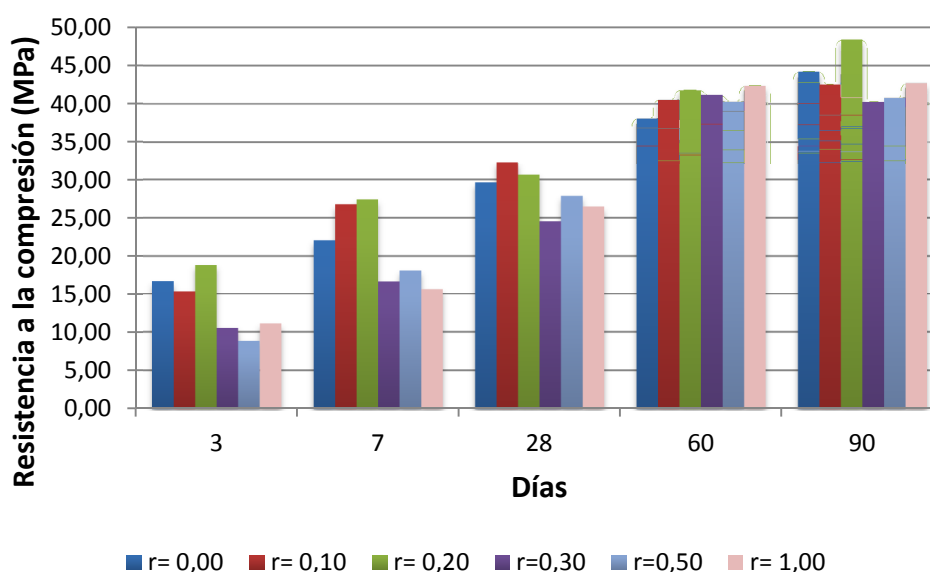
MEZCLA	EDAD ENSAYO (días)	f_m FLEX. (MPa)	Δf_m FLEX. (MPa)	Δf_m /día (MPa/día)	% $\Delta f_{mk} \sim f_{mk}^{REF}$ (%)
N 4,75 r=0%	3	3,19		1,061733307	100
	7	4,15	0,96	0,240262925	
	28	6,06	1,91	0,091092882	
	60	6,30	0,59	0,018591774	
	90	6,64	1,18	0,039357355	
C11 r=10%	3	2,85		0,948847869	78,85
	7	3,53	0,69	0,171616375	
	28	4,78	1,24	0,059275751	
	60	5,18	0,40	0,012585201	
	90	6,23	1,05	0,035086014	
C12 r=20%	3	2,80		0,93359308	78,55
	7	3,42	0,62	0,155598847	
	28	4,76	1,34	0,063634262	
	60	5,48	0,72	0,022596156	
	90	6,28	0,80	0,026543333	
C13 r=30%	3	2,54		0,845115304	79,76
	7	4,27	1,73	0,432473265	
	28	4,83	0,57	0,027022769	
	60	6,26	1,43	0,044620258	
	90	6,41	0,15	0,004881532	
C14 r=50%	3	2,17		0,723076993	73,56
	7	3,20	1,03	0,258568672	
	28	4,46	1,25	0,059711602	
	60	6,85	2,39	0,074653123	
	90	7,25	0,40	0,013424214	
C15 r=100%	3	2,36		0,787147107	76,13
	7	2,91	0,55	0,1372931	
	28	4,61	1,70	0,081068307	
	60	6,23	1,62	0,050626831	
	90	7,51	1,27	0,042408313	

RESISTENCIA A COMPRESIÓN

- DOSIFICACIÓN ÀRIDO/CEMENTO 1:3,25:

Entendiendo que la resistencia frente a cargas a compresión es la capacidad característica de los morteros, tomaremos este ensayo como de referencia para evaluar las capacidades de trabajo reales de las nuevas mezclas de mortero con sustitución de ACR.

Fig 8. Relación resistencias a Compresión para mezclas con dosificación 1:3,25 en función de la edad de ensayo



En la Fig 8, en la cual se grafica la evolución periódica de la resistencia a compresión se aprecia una tendencia creciente regular de todas las mezclas con un dato diferencial, las mezclas C1 y C2 (20% y 30% de sustitución de ACR respectivamente), dan resultados de compresión más elevados que la mezcla de referencia 3,25 N prácticamente durante todo el proceso de ensayo, solo a los 90 días cae la resistencia del C1 por debajo de 3,25 N, no así C2 que se mantiene como la más resistente.

Así como en los análisis de Flexotracción los resultados finales de todas las mezclas no difieren mucho del mortero de referencia. En la siguiente Tabla 11. Evolución de la

resistencia a Compresión para dosificación 1:3,25se analiza la evolución de las mezcla de manera detallada.

Tabla 11. Evolución de la resistencia a Compresión para dosificación 1:3,25

MEZCLA	EDAD ENSAYO (días)	f_m COMP. (MPa)	Δf_m COMP. (MPa)	Δf_m /día (MPa/día)	% $\Delta f_{mk} \sim f_{mk} REF$ (%)
N 3,25 r=0%	3	16,73		5,578175068	100
	7	22,11	5,37	1,343200506	
	28	29,67	7,56	0,359981886	
	60	38,12	8,45	0,264168677	
	90	44,21	6,09	0,203143665	
C1 r=10%	3	15,41		5,135001658	109,07
	7	26,80	11,40	2,849550979	
	28	32,36	5,56	0,264533605	
	60	40,57	8,21	0,256505189	
	90	42,55	1,98	0,065969335	
C2 r=20%	3	18,86		6,285496044	103,33
	7	27,44	8,59	2,146283419	
	28	30,66	3,21	0,153064684	
	60	41,83	11,18	0,349227065	
	90	48,44	6,61	0,220303123	
C3 r=30%	3	10,53		3,510933248	82,76
	7	16,73	6,19	1,548404657	
	28	24,55	7,83	0,372624681	
	60	41,21	16,66	0,520547197	
	90	40,26	0,95	0,031684197	
C4 r=50%	3	8,86		2,95291307	94,03
	7	18,15	9,29	2,322606986	
	28	27,90	9,75	0,464116056	
	60	40,30	12,40	0,387607841	
	90	40,83	0,53	0,017767471	
C5 r=100%	3	11,12		3,707523892	89,30
	7	15,72	4,60	1,150156601	
	28	26,49	10,77	0,51285355	
	60	42,38	15,89	0,496511711	
	90	42,76	0,38	0,012565588	

En la Tabla 11 se aprecia que el mayor incremento de resistencia se produce en las edades más tempranas del mortero tanto en el de referencia (N 3,25), como en C1 y C2 con sustituciones de 10% y 20% respectivamente. (Debido al CEM I 42,5 N/SR)

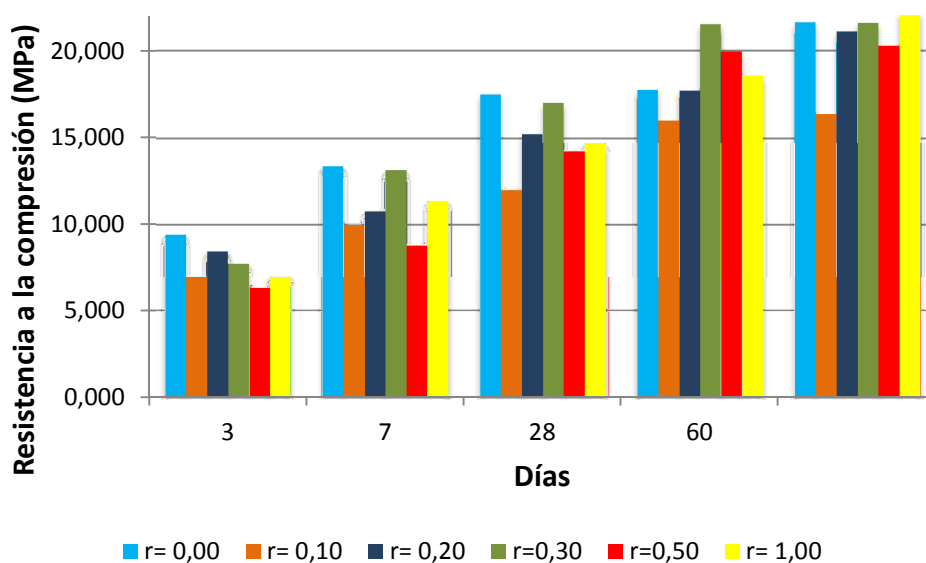
Estas dos mezclas tienen también una resistencia a los 28 días superior a la de referencia. Ha sido demostrado en los estudios anteriores que morteros con porcentajes de sustitución de hasta un 30% de ACR pueden dar mejores prestaciones que un mortero elaborado tan solo con ASN.

Esto se puede deber a la capacidad de retención de la humedad que se ha comentado anteriormente, así como al mayor contenido en finos del ACR, que sumado a las ya conocidas capacidades del agregado de ASN puede resultar en un mortero mejorado.

Las mezclas con mayor porcentaje de sustitución no han dado resultados superiores al $r = 0,00$, pero cabe destacar que la variación porcentual de todas las mezclas, incluida $r = 1,00$ con un porcentaje de sustitución del 100% ACR, no varía más de un 10% respecto a la del de referencia.

- DOSIFICACIÓN ÀRIDO/CEMENTO 1:4,75:

Fig 9. Relación resistencias a Compresión para mezclas con dosificación 1:4,75 en función de la edad de ensayo



La lectura de la Fig 9, corresponde a la de una dosificación más seca o pobre en cemento donde se evidencia una disminución de la capacidad resistente. En este caso destaca una resistencia más diferenciada del mortero de referencia sobre el resto de mezclas, siendo el $r = 0,30$ (con una sustitución del 30% de ACR) el que más se asemeja. Finalmente y coincidiendo con la flexión en la misma dosificación, la progresión lenta en la hidratación del $r = 1,00$ acaba consiguiendo igualar los resultados de las mezclas más resientes a los 90 días.

Como detalla la Tabla 12 el crecimiento inicial hasta los 28 días de maduración para las mezclas de dosificación 1:4,75 es de hasta un 30% menor que la mezcla de referencia 4,75 N. Aunque nuevamente si observamos los resultados de resistencia a final del proceso de ensayo a 90 días el $r = 1,00$ (sustitución del 100% de ACR), vuelve a superar al mortero de referencia; en este caso un 2% superior, diferencia anecdótica, pero no es así la tendencia de todas las sustituciones puras a igualar o sobrepasar finalmente la resistencia del mortero de referencia elaborado con ASN.

Tabla 12. Evolución de la resistencia a Compresión para dosificación 1:4,75

MEZCLA	EDAD ENSAYO (días)	f_m COMP. (MPa)	Δf_m COMP. (MPa)	Δf_m /día (MPa/día)	% $\Delta f_{mk} \sim f_{mkREF}$ (%)
N 4,75 r=0%	3	9,44		3,145450299	100
	7	13,36	3,93	0,981433188	
	28	17,53	4,17	0,198424332	
	60	17,80	0,27	0,008550173	
	90	21,64	3,83	0,12775014	
C11 r=10%	3	7,02		2,338820647	68,55
	7	10,02	3,00	0,750895191	
	28	12,02	2,00	0,095062241	
	60	16,04	4,02	0,12571921	
	90	16,41	0,37	0,01229536	
C12 r=20%	3	8,50		2,83198618	87,24
	7	10,80	2,30	0,5750783	
	28	15,29	4,50	0,214058934	
	60	17,75	2,46	0,076824887	
	90	21,11	3,36	0,112076934	
C13 r=30%	3	7,77		2,590807967	97,34
	7	13,14	5,36	1,340667122	
	28	17,06	3,93	0,187036165	
	60	21,52	4,46	0,139336152	
	90	21,61	0,09	0,002972505	
C14 r=50%	3	6,33		2,108451543	81,17
	7	8,84	2,51	0,628279377	
	28	14,23	5,39	0,256619795	
	60	19,99	5,76	0,17993364	
	90	20,29	0,30	0,010065981	
C15 r=100%	3	7,03		2,342198493	83,87
	7	11,36	4,34	1,083781925	
	28	14,70	3,34	0,159048297	
	60	18,62	3,92	0,122362475	
	90	22,18	3,56	0,118832626	

COMPARATIVA ENTRE RESITENCIA A FLEXOTRACCIÓN Y RESITENCIA A COMPRESIÓN

Según indica la Tabla 13 la relación entre las resistencias es, en el caso de la dosificación 1:3,25, de un 27.54% a los 28 días y de un 22,35% a los 90, días de media para todas las mezclas. La relación se mantiene en todas la serie exceptuando el C3 (1:3,25; $r = 0,30$), con una variación superior entre las dos capacidades resistentes.

Para las mezclas con dosificación 1:4,75, el porcentaje de la diferencia entre resistencias a los 28 días es de un 32.74% y un 33% para los 90 días. Se evidencia que la menor cantidad de cemento respecto del árido hace menores las diferencias entre ambas resistencias.

Tabla 13. Porcentaje de Flexión respecto a la resistencia a Compresión

MEZCLA	f_{mk} COMPRESIÓN (MPa)		f_{mk} FLEXIÓN (MPa)		FLEXIÓN/COMPRESION (%)	
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
N3,25	29,67	44,21	7,94	9,81	26,75	22,19
C1; $r = 0,1$	32,36	42,55	8,63	9,51	26,67	22,35
C2; $r = 0,2$	30,66	48,44	8,27	8,91	26,99	18,40
C3; $r = 0,3$	24,55	40,26	7,47	9,76	30,42	24,24
C4; $r = 0,5$	27,90	40,83	7,89	9,63	28,28	23,58
C5; $r = 1,0$	26,49	42,76	6,93	9,68	26,15	22,65
N4,75	17,53	21,635	6,06	6,645	34,57	30,71
C11; $r = 0,1$	12,02	16,41	4,78	6,23	39,76	37,99
C12; $r = 0,2$	15,29	21,11	4,76	6,28	31,13	29,74
C13; $r = 0,3$	17,06	21,61	4,83	6,41	28,32	29,65
C14; $r = 0,5$	14,23	20,29	4,46	7,25	31,33	35,73
C15; $r = 1,0$	14,70	22,18	4,61	7,51	31,38	33,83

Es interesante también comparar las diferencias entre mezclas con la misma cantidad de sustitución de árido ACR frente a la variación de dosificación.

**Tabla 14. Porcentaje de relación entre resistencias en función de la dosificación
(1:4,75/1:3,25)**

SUSTITUCIÓN ACR	COMPRESIÓN (%)		FLEXOTRACCIÓN (%)	
	28 días	90 días	28 días	90 días
r=0,0	59,09	48,93	76,36	67,72
r=0,1	37,14	38,57	55,36	65,54
r=0,2	49,88	43,58	57,52	70,43
r=0,3	69,50	53,68	64,71	65,67
r=0,5	51,00	49,68	56,50	75,29
r=1,0	55,49	51,88	66,58	77,50
Media	53,68	47,72	62,83	70,35

Según se detalla en la Tabla 14 las variaciones de entre mismo tipo de resistencia a distintas edades comparando entre distintas dosificaciones, la mayor variación de capacidad resistente se produce en el ensayo de compresión ya que la dosificación 1:4,75 no logra pasar del 53,68% a mediana edad y 47,72% a 90 días respecto los valores de la dosificación 1:3,25.

Es menor la disminución de la capacidad de resistencia a flexión al cuando se usa una mezcla con menos cemento, los resultados llegan a ser de un 70% de la dosificación más rica.

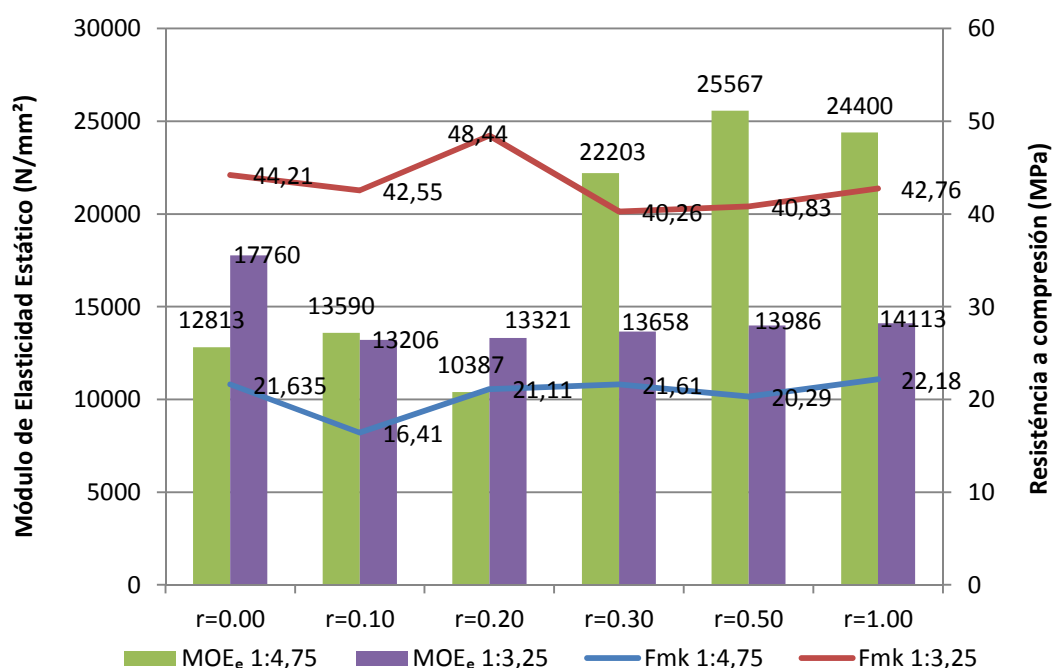
Cabe destacar que el porcentaje de sustitución que provoca mayores diferencias de resistencia entre dosificaciones es el que reemplaza tan solo un 10% del árido por ACR.

3.3.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO (MOE_E)

El MOE_E ha sido obtenido mediante el cálculo de la función de la recta que define la curva “tensión/deformación” de cada mortero ensayado a compresión a los 90 días. Según se indica en la Fig. 10 la evolución del MOE_E de compresión para la dosificación 1:3,25 no experimenta grandes cambios respecto del mortero de referencia, se entiende que la acción del cemento fija la capacidad de deformación del mortero produciendo una rotura más brusca, propia de un material rígido.

En cambio para la dosificación 1:4,75 los valores del MOE_E en función del esfuerzo a compresión doblan su valor respecto del material de referencia al llegar sustituciones del ACR iguales o mayores del 30%. Esto significa que, obviamente al ser una mezcla más pobre, tiene más capacidad de deformación cuando se le aplica una carga axial aunque la capacidad de resistencia de esa carga sea la mitad que en la dosificación 1:3,25. Se debe a la baja densidad de las partículas mayores del ACR, que son capaces de absorber la deformación y perder volumen, aunque no consiguen soportar grandes cargas superiores a los 22,18 MPa.

Fig. 10. Resumen resultados MOE_E y resistencia a Compresión

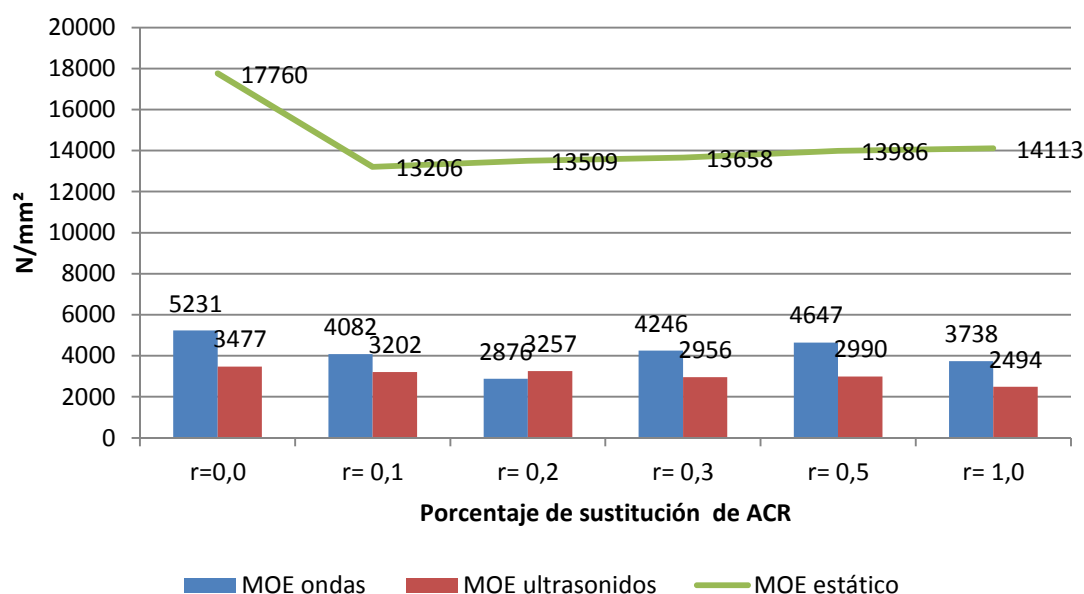


3.3.3 ANALISIS DEL MÓDULO ELASTICO DINÁMICO (MOE_D)

En este apartado se compararán las dos lecturas del MOE_D , los resultados del ensayo mediante frecuencia de ondas sonoras se contrastaran con los resultados del ensayo mediante propagación de ultrasonidos. Ambas letras nos dan las características de elasticidad dinámica de los morteros ante un esfuerzo axial o compresión.

Los datos que se usan para la comparativa, así como en el caso del MOE_E pertenecen al ensayo de los morteros a los 90 días, final de la campaña de ensayos.

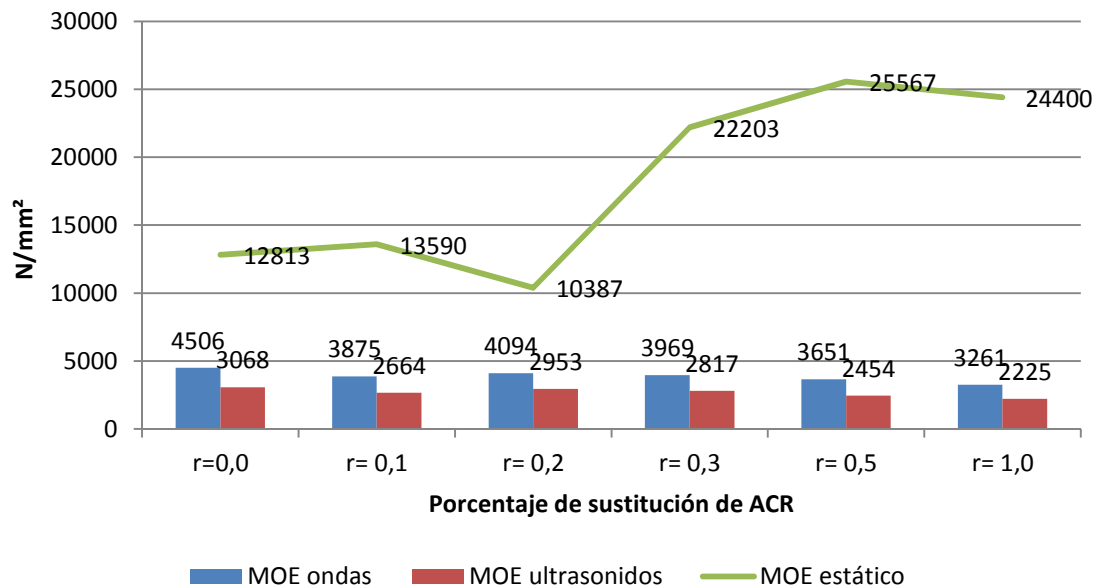
Fig 11. MOE dinámico dosificación 1:3,25



Como se puede observar en la gráfica de la Fig 11, las tendencias de los módulos de elasticidad dinámicos así como al comparar con el módulo de elasticidad estático son muy similares. Coinciden en un pico inicial debido a que se trata del mortero de referencia, menos rígido y van reduciéndose en función del aumento de la sustitución por árido reciclado. Sigue siendo notable la forma en que se fija la tendencia, casi plana, debido a la acción de fijación del cemento de esta mezcla más magra.

Los valores de MOE_D aparecen menores ya que la afectación de una acción dinámica hace mucho más sensible a la muestra que una acción de carácter estático.

Fig 12. MOE dinámico dosificación 1:4,75



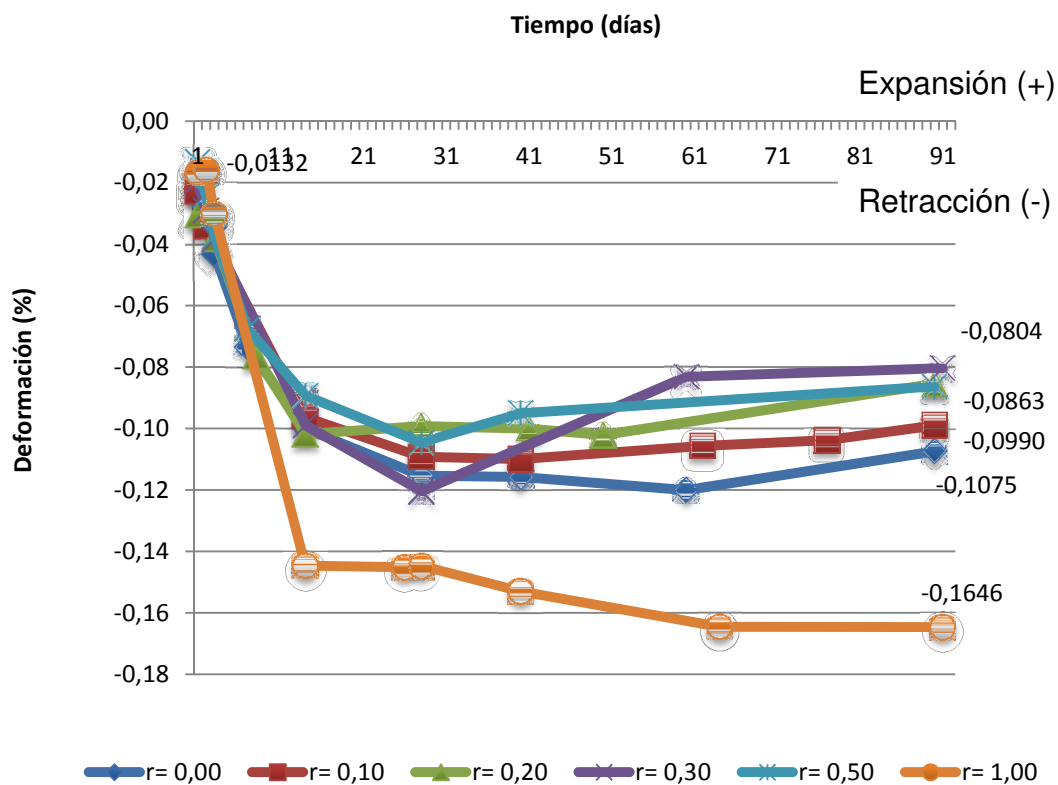
En la gráfica representada en la Fig 12, se aprecia una tendencia similar a la de la dosificación anterior en cuanto a valores representativos de modulo elástico dinámico, aunque difieren mucho de la tendencia que dibuja el módulo elástico estático.

Como se puede comprobar a simple vista, las diferencias entre las distintas modalidades del ensayo distan en sus resultados pero aun así hay similitudes. Los resultados de los módulos elásticos siguen siendo proporcionalmente más altos, teniendo en cuenta la disminución de la resistencia que caracteriza al material dado el contenido de cemento de la dosificación.

3.3.4 ENSAYO DE RETRACCIÓN POR SECADO

Para la realización de la valoración de la evolución de las muestras frente a la retracción por secado se valorará en dos partes: primero los datos obtenidos mediante el seguimiento de la evolución del material durante el curado, posteriormente se enfrentan los resultados de la evolución de las probetas en condiciones ambientales; las probetas selladas con parafina nos darán la retracción básica y las que están descubiertas aportarán la retracción por total. La diferencia entre las dos será la llamada retracción por secado.

Fig. 13. Evolución de la retracción por secado para la dosificación 1:3,25



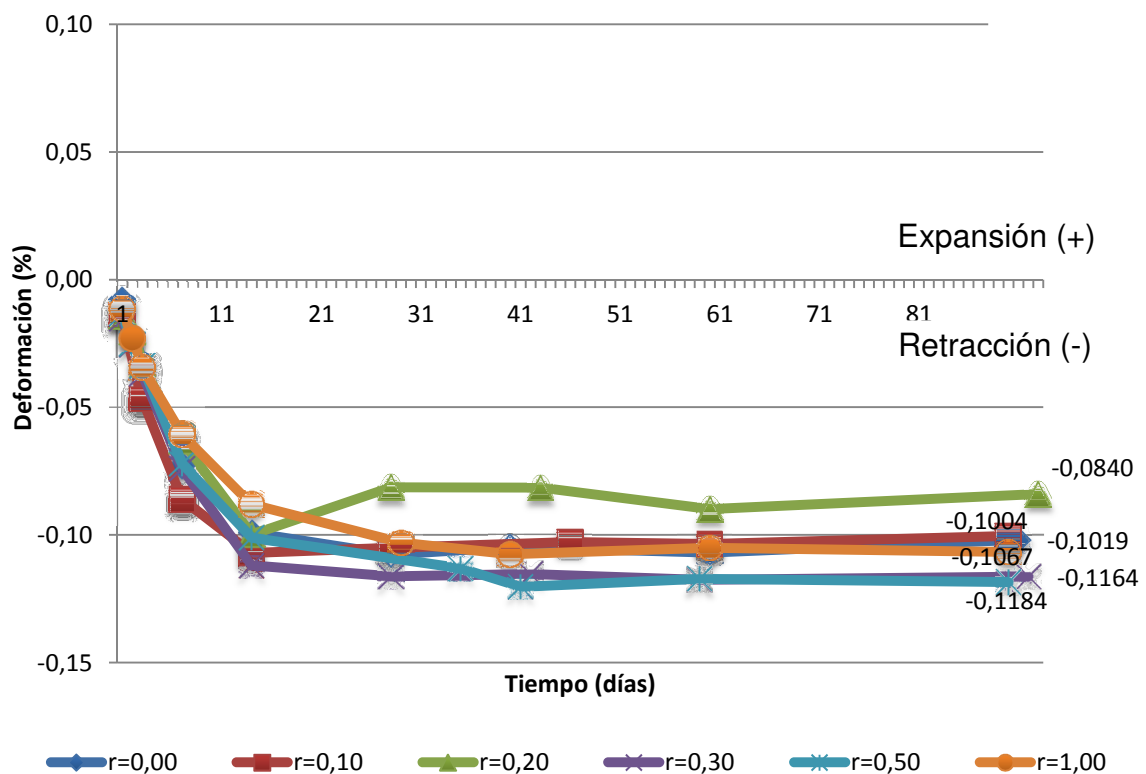
En la gráfica representada en la Fig. 13, se comparan todas las mezclas pertinentes a la dosificación 1:3,25, mediante esta comparación se podrán deducir las capacidades de trabajo de los morteros. Destacan los buenos resultados obtenidos por todas aquellas mezclas con un porcentaje de sustitución menor del 30%, ya que todas ellas han resultado tener porcentajes de retracción menores.

El caso específico del $r= 0,30$ ha marcado una retracción un 30% menor a los resultados finales del mortero de ASN o de referencia.

Los resultados se pueden explicar por la compacidad que ofrece el gran contenido en finos el material y la probable actividad puzolánica que puede haber retenido las variaciones volumétricas. Tampoco hay que olvidar el efecto de liberación progresiva de la humedad que añadido a las cualidades ya conocidas del mortero de ASN pueden crear un mortero mejorado sin necesidad de aditivos y además mediante el reciclaje de residuos.

La mezcla compuesta íntegramente por ACR no ha dado resultados que la hagan aceptable de ningún modo siendo susceptible de agrietamientos severos en piezas de dimensiones mayores.

Fig. 14. Evolución de la retracción por secado para la dosificación 1:4,75



En la gráfica de la Fig. 14, se repiten las características observadas en todos los ensayos realizados con esta dosificación, se acentúan las propiedades del ACR y destacan las variaciones menos recomendables para su utilización. No obstante el porcentaje de retracción no difiere más de un 30% respecto del resultado más negativo, en este caso el $r=0,50$ con un 50% de sustitución de ACR.

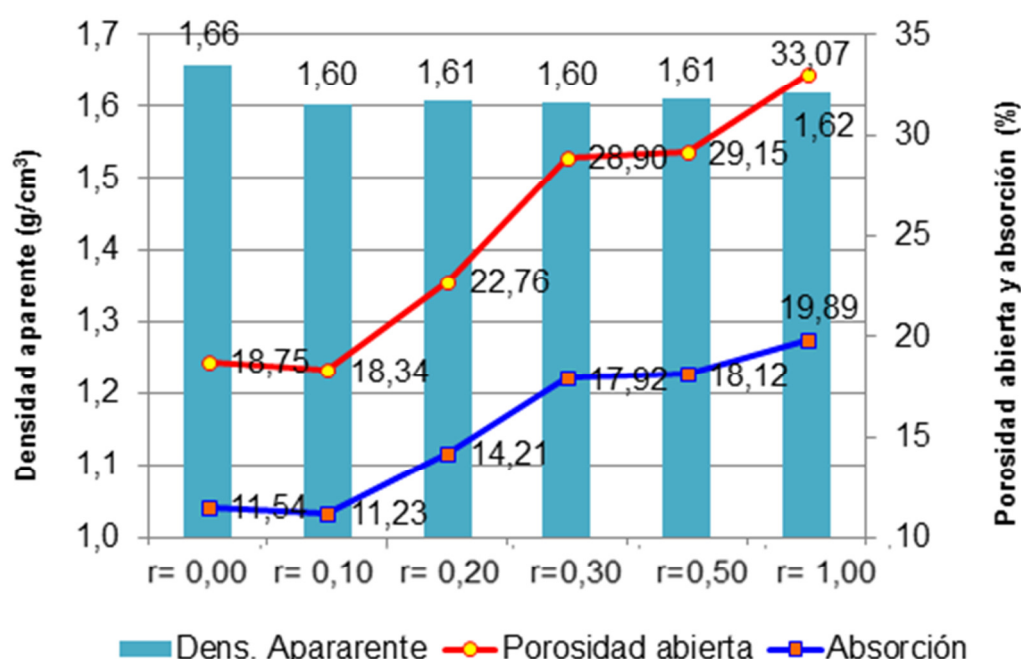
Con esta dosificación el resultado menos desfavorable ha sido el del $r= 0,20$ confirmándose de esta manera las buenas aptitudes que pueden presentar las mezclas con sustitución menor o igual al 20% de ACR.

3.3.5 DENSIDAD APARENTE Y RELATIVA DEL MORTERO ENDURECIDO. ÍNDICE DE POROSIDAD

Finalmente solo quedará analizar los datos del ensayo de caracterización de la densidad del mortero endurecido, estos datos han sido calculados mediante los porcentajes de aire que contienen las muestras. Se busca conocer el tanto por ciento poroso y la porosidad accesible del material, para conocer así su densidad y para tener en cuenta posibles patologías que le puedan influenciar mediante la agresión de agentes externos.

Los ensayos se han realizado a los 60 días después del amasado de las mezclas.

Fig. 15. Evolución de la Densidad Aparente, Relativa y índice de porosidad para la dosificación 1:3,25



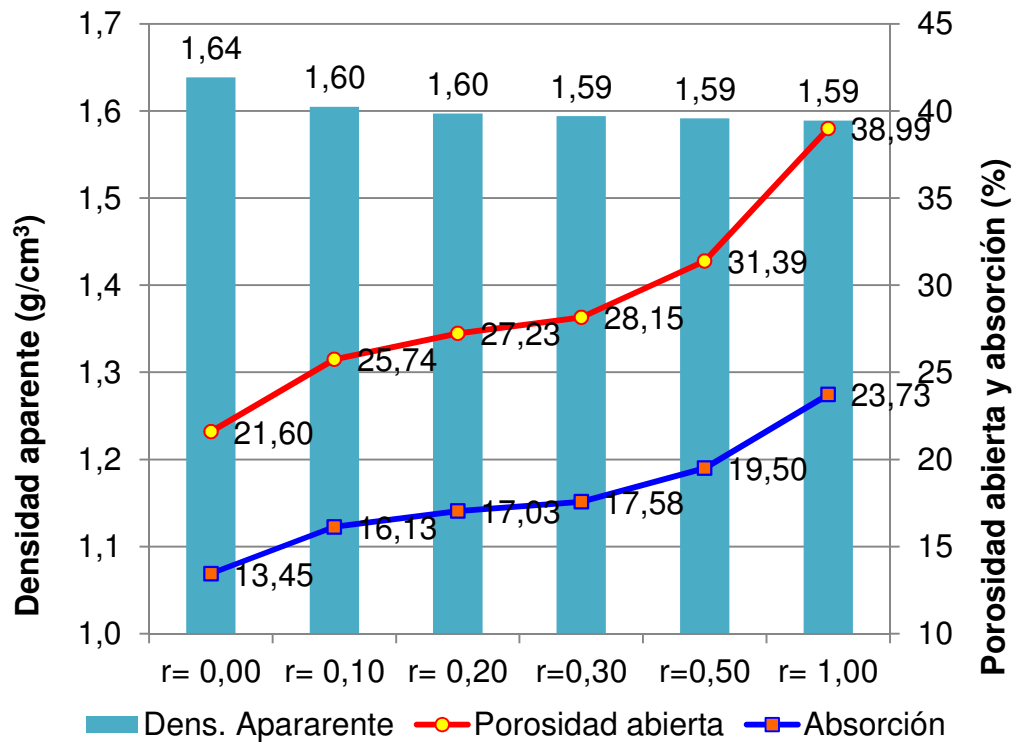
Al analizar las gráficas representadas en la Fig. 15 y la Fig. 16, se aprecia que, como cabía esperar, tanto la porosidad como la absorción de las muestras crece en función del incremento de sustitución de ACR. Nuevamente nos referimos a la porosidad del material para dar explicación a este comportamiento.

El mayor porcentaje de porosidad abierta lo tiene, para ambas dosificaciones, la mezcla con sustitución total, en la que es evidente la influencia característica de la cerámica. Lo que resulta remarcable es la diferencia entre la porosidad de la dosificación 1:3,25 respecto de la 1:4,75, de 33,7% y 38,99% respectivamente, se puede considerar una diferencia notable pero se debe tener en cuenta la gran diferencia de carga en cemento entre las dos muestras, como agente que ayuda a sellar ya que actúa de película protectora sobre el árido, por tanto se esperaría que la más pobre en cemento actúe como una esponja porosa. La diferencia real y esperada es la que se produce entre la muestra de referencia y la muestra con total sustitución que experimenta un crecimiento del 16% de media para las dos dosificaciones.

También se observa una variación del 10% en la absorción, ligada a la porosidad, pero en este caso nos indica que las redes porosas no profundizan en los morteros, se podría decir que el material del que estamos hablando tiene un alto porcentaje poroso pero los poros son independientes y no se comunican por tanto se podría entender en cierta manera que está dotado de aptitudes aislantes, del interior del mortero frente a agentes externos.

Así como los resultados de porosidad y absorción cumplen plenamente con las expectativas esperadas para un material de estas características, no es así el caso de la densidad relativa, se hace difícil de explicar que un material tan poroso formado con un árido que en granulometría es denso por los finos, pero que es relativamente hueco, no reproduzca una variación más marcada en lo que a densidad aparente se refiere. La tendencia de este parámetro debería ser totalmente contraria a las tendencias de la porosidad y la absorción, pero los datos recopilados en esta investigación tan solo denotan una variación de $0,45 \text{ gr/cm}^3$ de media entre las mezclas opuestas, de 0% de sustitución a 100%. Lo que complica el racionamiento es que una densidad aparente de un mortero convencional de ASN de 1590 Kg/m^3 se puede entender como normal pero la variación es tan ínfima que cuesta creer que un mortero con un 100% de ACR tenga prácticamente la misma densidad.

Fig. 16. Evolución de la Densidad Aparente, Relativa y índice de porosidad para la dosificación 1:4,75



CAPÍTULO IV. CONCLUIONES

4.1 CONCLUSIONES GENERALES

El objetivo principal de este estudio se basa en analizar las posibilidades de sustitución de los áridos normalizados de uso en el mortero por áridos complementarios reciclados. Según los resultados obtenidos en este estudio se puede evidenciar, como ya lo han hecho investigaciones precedentes, que el comportamiento de las nuevas mezclas se debería incorporar y tener en cuenta en los procesos constructivos actuales, así como se hace en países como Holanda, Estonia y Dinamarca.

Después de realizar los ensayos comentados hasta este punto podemos extraer las siguientes conclusiones:

CONCLUSIONES DERIVADAS DEL ESTUDIO DE LOS ÁRIDOS

Con la intención de introducir el uso de árido fuera de normativa en el proceso de elaboración del mortero ha sido necesario caracterizar sus características granulométricas y diseñar su composición respecto al árido normalizado de referencia. Una vez analizado el Árido Cerámico Reciclado, se puede concluir que es necesario un control estricto de la granulometría o en todo caso un diseño específico del proceso de machacado y composición para el uso en morteros.

Se trata de un material con un alto contenido en partículas superiores a 4mm de diámetro y que a su vez tiene un alto contenido en finos. Por tanto será necesario un proceso previo a su utilización acomodando la granulometría de forma similar a la del árido de referencia en la composición de morteros, la Arena de Sílice Natural.

También será necesario tener en cuenta una mayor capacidad de absorción del agua de amasado y un mayor peso volumétrico a la hora de adaptar las dosificaciones para el amasado. El agua de amasado incrementa hasta un 92% en sustitución total del árido en sustitución total para la dosificación 1:3,25 y un 172% para la dosificación 1:3,25.

CONCLUSIONES DERIVADAS DEL ESTUDIO DE LOS MORTEROS

Al comparar las propiedades de las distintas mezclas de mortero con sustitución de ACR con el mortero de referencia a distintas edades se extraen las siguientes conclusiones:

La resistencia a compresión y a flexotracción de los materiales disminuye en las mezclas con ACR, a los 28 días de su amasado, un promedio de un 2% respecto al mortero de referencia para las mezclas de dosificación 1:3,25; para las de 1:4,75 se observa un descenso promedio del 19%. En cambio a los 90 días de maduración los resultados para ambas resistencias y dosificaciones se acaban igualando e incluso superando por mezclas con un alto contenido en ACR.

El módulo de elasticidad estático o MOE_E aumenta hasta el doble en las mezclas que contienen ACR, al someter a las probetas endurecidas a compresión, pese a tener una resistencia a la carga menor para la dosificación 1:4,75. Para la dosificación 1:3,25 disminuyen respecto al mortero de referencia, pero los resultados tan solo son decrecen una media de un 20%. Ambas reacciones se deben a la capacidad del material cerámico, más poroso de absorber las deformaciones.

Al contrario, el módulo de elasticidad dinámico o MOE_D estudiado mediante: el análisis de transmisión de frecuencias sonoras y análisis de transmisión de ultrasonidos, ha resultado decreciente a medida que aumenta la sustitución, el valor promedio de decrecimiento progresivo es del 25%.

El ensayo de retracción por secado ha resultado muy positivos en mezclas con un porcentaje de sustitución de ACR inferior al 20% en la dosificación 1:3,25, las retracciones han sido menores que las efectuadas por el mortero de referencia en un 33%.

Para la dosificación 1:4,75, los resultados han sido igualmente positivos teniendo en cuenta que todas las mezclas con agregado cerámico han tenido una retracción menor que el mortero de referencia. Ambas respuestas de los nuevos morteros se deben a la capacidad del árido de retener la humedad y liberarla de forma más pausada en el tiempo consiguiendo así una humedad interior más continua durante todo el proceso de fraguado.

Finalmente los análisis de densidad aparente e índice de porosidad nos revelan que la porosidad externa de los morteros crece en función del aumento de la sustitución de ACR, como era de esperar. No es así en el caso de la densidad aparente, que disminuye pero no de forma proporción a la sustitución, hecho que puede ser debido a la naturaleza del ensayo y a que la porosidad del árido es independiente y no conectiva.

En general, los datos extraídos de los distintos análisis ayudan a confirmar la creencia de que es posible establecer unos parámetros normalizados para el uso del árido reciclado cerámico en la elaboración de morteros. La investigación y sus resultados quedan en manos de los profesionales interesados en aplicar nuevas técnicas y ampliar los horizontes de la reutilización en nuestro país.

4.2 CONCLUSIONES PERSONALES

Durante la realización de este trabajo de final de grado he podido recuperar mis conocimientos en el área de materiales, desarrollados sobretodo en asignaturas pertenecientes a los primeros cursos de este grado, que al final quedan en un segundo plano, pero que no dejan de ser de vital importancia para un técnico de la edificación. También me ha permitido conocer los procedimientos y metodología de trabajo de un proceso de investigación normalizado, a nivel académico. Cualquier investigación que se deba realizar al largo de una carrera profesional se asienta sobre las mismas bases que se han usado en este trabajo y, por eso serán un aprendizaje a tener en cuenta el resto de mi experiencia vital.

BIBLIOGRAFIA CITADA

1. *The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste.* **Luiz A. Pereira-de-Oliveira, Joao P. Castro-Gomes, Pedro M.S. Santos.** Covilhã, Portugal : Construction and Building Materials, 2012, Vol. 31.
2. *Behaviour of cementitious mortars containing different kinds.* **Valeria Corinaldesi, Giacomo Moriconi.** 23 (2009) 289–294, Ancona, Italy : Construction and Building Materials, 31 January 2008.
3. *Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability.* **F. Bektas, K. Wang, H. Ceylan.** 23 (2009) 1909–1914, Ames, , United States : Construction and Building Materials, 22 October 2008.
4. **ASTM Committee C-9.** ASTM C 1260 – 94, Standard Test Method Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). *Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01.*
5. *Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings.* **Corinaldesi, Valeria.** Ancona, Italy : Construction and Building Materials, 25 April 2012, Vol. 35 (2012) 778–784.
6. *Incorporation of fine ceramics in mortars.* **Joao Silva a, Jorge de Brito , Rosario Veiga.** Lisbon, Portugal : Construction and Building Materials , 26 November 2007, Vol. 23 (2009) 556–564.
7. *Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition.* **Silva, J., Brito, J. de i Veiga, and R.** Lisbon, Portugal : JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING, MARCH 2010.
8. *Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick.* **G. Moriconi, V. Corinaldesi and R. Antonucci.** December 2003, pp 702-708, University of Ancona, Ancona, Italy : Matriaux et Constructions, December 2003, Vol. Vol. 36.
9. *Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing.* **J.R. Jiménez, J. Ayuso, M. López, J.M. Fernández, J. de Brito.** Córdoba, Spain : Construction and Building Materials, 22 November 2012, Vol. 40 (2013) 679–690.

-
10. *The use of waste ceramic tile in cement production*. **Nuran Ay, Mevluet Uenal**. Eskisehir, Turkey : Cement and Concrete Research, 3 January 2000, Vol. 30 (2000) 497±499.
 11. *Use of rubble from building demolition in mortars*. **V. Corinaldesi, M. Giuggiolini, G. Moriconi**. 22 (2002) 893–899, Ancona, Italy : Waste Management, 13 June 2002.
 12. **ASTM Committee C-1 on Cement**. C 150 – 99a Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02*. Published November 1999.
 13. *Fine ceramics replacing cement in mortars Partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars*. **Joao Silva, Jorge de Brito, Rosario Veiga**. (2008) 41:1333–1344, Lisbon : Materials and Structures, 2 November 2007. DOI 10.1617/s11527-007-9332-z.
 14. *ASTM C 144 – 99 Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar*. **ASTM Committee C-12**. s.l. : American Association State Highway and Transportation Officials Standard, September 1999, Vol. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.
 15. **ASTM Committee C-9 on Concrete**. ASTM C 136 – 96a Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02*. West Conshohocken, USA : s.n., January 1997.
 16. **ASTM Committee C-9**. ASTM C 702 – 98 Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. *Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02*. December 1998.
 17. ASTM C 117 – 95 Standard Test Method for Materials Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing. *Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02*. May 1995.
 18. **ASTM Committee C-9**. ASTM C 29/C 29M – 97 Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02*. September 1997.
 19. **ASTM Committee C09**. ASTM C 128 – 04a Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption. November 2004.
 20. **ASTM Committee C-1 on Cement**. ASTM C 150 – 99a Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02*. November 1999.

21. **ASTM Committee C01 on Cement.** ASTM C 150 – 99a Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02*. November 1999.
22. **ASTM Committee C-12 .** ASTM C 270 – 00 Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. *Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01*. April 2000.
23. **ASTM Committee C01.** ASTM C 305 – 06 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. August 2006.
24. —. ASTM C 230/C 230M – 03 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement¹. December 2003.
25. **ASTM C597-09**, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
26. **ASTM C348-08**, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.
27. **ASTM C349-08**, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.
28. **ASTM Committee C01.** ASTM C 490 – 00 Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. *Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01*. September 2000.
29. **ASTM C31 / C31M-12**, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
30. **ASTM C349-02**, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
31. *Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento.* **J. R. Rosell, I. R. Cantalapiedra.** Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona, España : s.n., enero-marzo 2011, Vol. Vol. 61, 301, 39-48. ISSN: 0465-2746.
32. **ASTM E1876-01(2006)**, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.

33. **ANEFHOP**. UNE-EN 1015-12:2000 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros de revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes. 2000-11-29.

34. **ASTM C642-13**, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer el apoyo y el trabajo realizado por el director de este proyecto el Dr. Gómez Soberón, por su interminable paciencia y su trato personal e instructivo. Por abrir una puerta de contacto con la escuela de edificación que después de tantos años no había conseguido tener, con el laboratorio y con los materiales y su análisis.

Agradecer sinceramente a la M.C F. Guadalupe Cabrera Covarrubias, la codirectora de este proyecto. Lupita, gracias por haber sido mi compañera, por todos los buenos ratos y el trabajo que hemos realizado, sin ti este trabajo nunca hubiera sido posible.

A la Dra. Antonia Navarro, profesora de la escuela, por tener siempre tiempo para nosotros y guiarnos a través del laboratorio y cuando íbamos perdidos.

Al Sr. Marc Tous, técnico del laboratorio de la escuela, por la inmensa paciencia, la atención y ayuda recibidas.

A tota la meva família y amics que han esperat tot aquest temps y que es trauran un gran pes de sobre quan em tituli.

Y dedicar el que finalment és per mi una victòria al meu pare, Joan. Perquè ell hagués estat la persona més feliç del món en aquest moment.

Perquè nosaltres si que hem pogut acabar, encara que jo ja tenia dos anys quan tu tenies la meva edat, y perquè t'ho dec.